



Холдинговая компания «Ленинец»
Дирекция по проблеме «Новые гиперзвуковые технологии»



Copyright 2006, Copyright
Holder Organization & Address in Cyrillic.
The Department of Defense has permission
to use for government purposes only.
All other rights are reserved by
the copyright holder.

5-й Международный симпозиум «Термохимические и плазменные процессы в аэродинамике»

Санкт-Петербург
19 - 21 июня, 2006

CSP 06-5074
DTIC Copy
Distribution A:
Approved for public release;
distribution is unlimited.

Организован Холдинговой компанией «Ленинец»
при участии:

НИИГС
EOARD
AFOSR
AFRL

Совместной лаборатории по гиперзвуковым технологиям
С-ПбГУ и ХК «ЛЕНИНЕЦ»

20061010227

УДК 629.7.016.55

**СИМПОЗИУМ
ТЕРМОХИМИЧЕСКИЕ И
ПЛАЗМЕННЫЕ ПРОЦЕССЫ В
АЭРОДИНАМИКЕ**

Представлены аннотации докладов
Международного симпозиума «Термохимические и
плазменные процессы в аэродинамике»,
проводимого Холдинговой компанией «Ленинец»
при участии НИПГС, EOARD, AFOSR, AFRL с 19
по 21 июня 2006 года, г. Санкт-Петербург.

ISBN 5-88877-016-7

УДК 629.7.016.55

© НИПГС ХК «ЛЕНИНЕЦ» 2006

Санкт-Петербург
«Радиоавионика» 2006

REPORT DOCUMENTATION PAGE

Form Approved OMB No. 0704-0188

Public reporting burden for this collection of information is estimated to average 1 hour per response, including the time for reviewing instructions, searching existing data sources, gathering and maintaining the data needed, and completing and reviewing the collection of information. Send comments regarding this burden estimate or any other aspect of this collection of information, including suggestions for reducing the burden, to Department of Defense, Washington Headquarters Services, Directorate for Information Operations and Reports (0704-0188), 1215 Jefferson Davis Highway, Suite 1204, Arlington, VA 22202-4302. Respondents should be aware that notwithstanding any other provision of law, no person shall be subject to any penalty for failing to comply with a collection of information if it does not display a currently valid OMB control number.

PLEASE DO NOT RETURN YOUR FORM TO THE ABOVE ADDRESS.

1. REPORT DATE (DD-MM-YYYY) 11-08-2006			2. REPORT TYPE Conference Proceedings		3. DATES COVERED (From - To) 19 June 2006 - 21 June 2006	
4. TITLE AND SUBTITLE Thermochemical Processes in Plasma Aerodynamics					5a. CONTRACT NUMBER FA8655-06-1-5074	
					5b. GRANT NUMBER	
					5c. PROGRAM ELEMENT NUMBER	
6. AUTHOR(S) Conference Committee					5d. PROJECT NUMBER	
					5d. TASK NUMBER	
					5e. WORK UNIT NUMBER	
7. PERFORMING ORGANIZATION NAME(S) AND ADDRESS(ES) Leninets Holding Company, NIPGS 212, Moskovsky Prospekt St. Petersburg 196066 Russia					8. PERFORMING ORGANIZATION REPORT NUMBER N/A	
9. SPONSORING/MONITORING AGENCY NAME(S) AND ADDRESS(ES) EOARD PSC 821 BOX 14 FPO 09421-0014					10. SPONSOR/MONITOR'S ACRONYM(S)	
					11. SPONSOR/MONITOR'S REPORT NUMBER(S) CSP 06-5074	
12. DISTRIBUTION/AVAILABILITY STATEMENT Approved for public release; distribution is unlimited. (approval given by local Public Affairs Office)						
13. SUPPLEMENTARY NOTES Copyright 2006, Copyright Holder Organization & Address in Cyrillic. The Department of Defense has permission to use for government purposes only. All other rights are reserved by the copyright holder.						
14. ABSTRACT The Final Proceedings for Thermochemical Processes in Plasma Aerodynamics, 19 June 2006 - 21 June 2006 - Active Thermal Protection on the Basis of Endothermic Reactions - The Problems of Catalysis at the Hydrocarbon Fuel Regeneration - Combustion of a Modified Hydrocarbon Fuel - Non-Equilibrium Kinetics with Hydrocarbon Components Participation - Plasma Aerodynamics of Flows - Introduction of a Laser Energy to the Stable Air and Intersected Shock Waves						
15. SUBJECT TERMS EOARD, Thermochemical Processes, Magnetohydrodynamic (MHD), Plasma Aerodynamic						
16. SECURITY CLASSIFICATION OF:			17. LIMITATION OF ABSTRACT UL	18. NUMBER OF PAGES 70	19a. NAME OF RESPONSIBLE PERSON SURYA SURAMPUDI	
a. REPORT UNCLAS	b. ABSTRACT UNCLAS	c. THIS PAGE UNCLAS			19b. TELEPHONE NUMBER (Include area code) +44 (0)20 7514 4299	



LENINETZ Holding Company



5th Workshop
Thermochemical and Plasma Processes in
Aerodynamics

Saint-Petersburg
19 – 21 JUNE, 2006

Hypersonic Systems Research Institute
LENINETZ Holding Company
212 Moskovsky pr., St. Petersburg, 196066, Russia

Organized by:

LENINETZ Holding Company

In co-operation with and under sponsorship of:

HSRI

EOARD

AFOSR

AFRL

JLHT SPSU and LENINETZ Holding Company

AQ F06-12-0361

We wish to thank the following for their contribution to the success of this conference: European Office of Aerospace Research and Development, Air Force Office of Scientific Research, United States Air Force Research Laboratory

СОДЕРЖАНИЕ:

1	<i>А.В.Корабельников, А.Л.Куранов</i> (ОАО «НИПГС», ХК «ЛЕНИНЕЦ», СПб) Работы ОАО «НИПГС» в области теплозащиты и преобразования топлива. Достижения и перспективы.....	11
2	<i>Б. В. Фармаковский, Т. С. Виноградова</i> (ФГУП ЦНИИ КМ «Прометей», Санкт-Петербург), <i>А.В. Корабельников, А.Л. Куранов</i> (ОАО «НИПГС», ХК «ЛЕНИНЕЦ», Санкт-Петербург) Разработка и исследование каталитических наноматериалов с аморфной и микрокристаллической структурой для паровой конверсии углеводородов.....	12
3	<i>Е.А. Власов, Н.В.Мальцева, А.Ю.Постнов, А.Н.Прокопенко</i> (Санкт-Петербургский государственный технологический институт) Суспензионный метод синтеза катализаторов паровой конверсии углеводородов	14
4	<i>С.Б. Леонов, Д.А. Яранцев</i> (ИВТАН, Москва) <i>А. Напартович, И. Кочетов</i> (ТРИНИТИ, Москва) Плазмо-химическая конверсия углеводородного топлива в скоростном потоке...	15
5	<i>А.В. Корабельников, А.Л.Куранов, А.В. Федотов</i> (ОАО «НИПГС» ХК «Ленинец» Санкт-Петербург) Численное моделирование плоского ТХР с двумя стенками конечной толщины..	18
6	<i>Е.А. Мещеряков, А.Ф. Чевагин, В.П. Старухин</i> (ЦАГИ, Москва) Расчетный анализ характеристик высокоскоростной прямооточной двухрежимной камеры сгорания, работающей на углеводородном топливе в режиме кислородной конверсии.....	19
7	<i>О.В. Волощенко, С.А. Зосимов, А.А. Николаев, В.Н. Острась, В.Н. Серманов, А.Ф. Чевагин</i> (ЦАГИ, Москва) Исследование рабочего процесса в высокоскоростной прямооточной камере сгорания с термохимической подготовкой жидкого углеводородного топлива.....	20
8	<i>А.Л.Куранов</i> (ОАО «НИПГС», ХК «ЛЕНИНЕЦ», Санкт-Петербург). <i>А.А.Кудрявцев, А.А. Богданов</i> (СПбГУ), <i>В.Л.Бычков, А.Ю. Ломтева</i> (МГУ, Москва) Фундаментальное исследование процессов ионизации воздушно-углеводородной смеси для оптимизации горения в камерах сгорания при использовании газовых разрядов.....	22
9	<i>А. Климов, В. Битюрин, И. Моралев, Б. Толкунов</i> (Институт высоких температур РАН, Москва), <i>А. Никитин, А. Величко</i> (ИХФ РАН, Москва), <i>Ю. Лебедев, И. Билера</i> (ИНХС РАН, Москва) Горение предварительно несмешанного топлива в высокоскоростном воздушном потоке, стимулированное плазменными образованиями.....	22
10	<i>И.В. Кочетов, С.Б. Леонов, А.П. Напартович</i> (ГНЦ РФ Троицкий Институт Инновационных и Термоядерных Исследований, Москва) Проведение численных расчётов для выяснения возможностей плазменного инициирования пламени в сверхзвуковом потоке смесей водорода и этилена с воздухом.....	25
11	<i>А.Ф. Александров, А.П. Еришов, С.А. Каменичиков, Е.Б. Колесников, А.А. Логунов, В.А. Черников, В.М. Шибков</i> (МГУ им. М.В.Ломоносова, физический факультет) О возможности применения импульсной плазменной струи для воспламенения воздушно-пропановой смеси.....	27
12	<i>В.Ю. Великодный В.Ю., В.П. Воротилин, А.В. Еремеев, Л.К. Никитенко, Ю.Г. Яновский</i> (Институт прикладной механики РАН, Москва), <i>А.Ф. Александров, В.Л. Бычков, И.Б. Тимофеев, В.А. Черников</i> (Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова) <i>Д. Ван Ви</i> (Университет им. Дж. Хопкинса, Лаборатория прикладной физики) Экспериментальное и теоретическое исследование процессов поджига «активированного пористого топлива».....	28

- 13 *Ю.Л. Серов* (ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург)
Плазменная детонация при сверхзвуковом движении в газоплазменных средах... 30
- 14 *С.В. Бобашев, Р.В. Васильева, А.В. Ерофеев, Б.Г. Жуков, Т.А. Лапушкина, С.А. Поняев* (Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург)
Газоразрядная плазма воздуха в сверхзвуковом МГД канале..... 33
- 15 *Е.Г. Шейкин* (ОАО «НИПГС», ХК «ЛЕНИНЕЦ», Санкт-Петербург)
Расчет проводимости потока создаваемой электронным пучком для МГД управления потоком..... 34
- 16 *В.А. Битюрин, А.Н. Бочаров, Д.С. Баранов* (ИВТ РАН, Москва), *А.В.Красильников, Ю.А. Пластинин* (ЦНИИМАШ, Королев, Московская область)
МГД управление потоком..... 35
- 17 *Doyle Knight and Hong Yan* (The State University of New Jersey, Piscataway, NJ), *Taylor Swanson, Greg Elliott, and Nick Glumac* (University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL)
Взаимодействие импульсного энерговклада с прямым скачком уплотнения: экспериментальное и численное исследования..... 36
- 18 *Ю. Ф. Колесниченко, Д. В. Хмара* (Институт Высоких Температур РАН, Москва), *Дойл Найт* (Rutgers University, New Brunswick, NJ)
Кинетическая модель СВЧ энерговыведения в воздухе..... 37
- 19 *К. В. Ходатаев* (ФГУП «Московский Радиотехнический Институт РАН»)
Инициация и поддержание слабой детонационной волны в потоке со скоростью выше скорости Чепмена-Жуге с помощью микроволнового разряда..... 39
- 20 *Datta Gaitonde, Miguel Visbal, and Subrata Roy*
Управление обтеканием секции крыла массовыми силами на основе плазмы..... 40
- 21 *В.А. Лашков, И.Ч. Машек, Ю.И. Анисимов, В.И. Иванов* (СПбГУ), *Ю.Ф. Колесниченко* (ИВТРАН, Москва), *О.А. Азарова* (Вычислительный Центр РАН, Москва)
Совместное использование вдува газа и СВЧ разряда для уменьшения сопротивления в сверхзвуковом полете..... 41
- 22 *В.М.Шибков, А.Д.Абрамова, А.Ф.Александров, В.А.Черников, А.П.Ершов, А.А.Карачев, Р.С.Константиновский, Л.В.Шибкова, В.В.Злобин* (Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова)
СВЧ разряды в высокоскоростном потоке: основные свойства и применение..... 42
- 23 *В.А. Сахаров, Н.П. Менде, С.В. Бобашев*, (Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН), *D. M. Van Wie* (Johns Hopkins University, U.S.A)
Электромагнитное устройство для воздействия на структуру сверхзвукового обтекания тела вращения..... 44
- 24 *Ю. Ф. Колесниченко, Д. В. Хмара* (Институт Высоких Температур РАН, Москва)
Кинетическое моделирование взаимодействия СВЧ поля с распадающейся лазерной плазмой в воздухе..... 46
- 25 *И.И. Липатов* (ЦАГИ, Московский регион)
Асимптотические модели управления течением в пограничном слое..... 47
- 26 *И.И.Есаков, Л.П. Грачев, К.В. Ходатаев* (ФГУП «Московский радиотехнический институт РАН»), *В.Л.Бычков* (Московский государственный университет)
Свойства микроволнового стримерного разряда в воздухе при различной его влажности и в присутствии водяного аэрозоля..... 49
- 27 *Н.А. Герасимов, В.С. Сухомлинов, С.В. Сухомлинов* (СПбГУ), *В.В. Кучинский* (ОАО «НИПГС» Холдинговой компании «Ленинец», Санкт-Петербург)
Распространение ударных волн в среде с Рэлеевским механизмом энерговыведения 51

- 28 *Jonathan Poggie* (Air Force Research Laboratory)
Тлеющие разряды постоянного тока: расчетное исследование их применения для управления потоками..... 53
- 29 *А.В. Лиханский, М.Н. Шнейдер, С.О. Мачерет, Р.Б. Майлс* (Princeton University, Princeton, New Jersey)
Численное моделирование асимметричного диэлектрического барьерного разряда..... 53
- 30 *И.Ч. Машек, В.А. Лашков, Ю.И. Анисимов* (Санкт-Петербургский Государственный Университет, Санкт-Петербург), *Ю.Ф. Колесниченко* (Объединенный Институт Высоких температур, Москва)
Гиперзвуковые плазменные струи, генерируемые квазистационарным магнито-плазменным компрессором и их применения в прикладной плазмодинамике..... 56

Стендовые доклады

- 1 *В. Бровкин, Ю. Колесниченко, Д. Хмара*, (ИВТ РАН, Москва), *И. Машек, В. Лашков* (СПбГУ)
Исследование СВЧ разряда, инициированного лазерным излучением в воздухе... 58
- 2 *Н.А. Герасимов, В.С. Сухомлинов, С.В. Сухомлинов* (СПбГУ)
Динамика вихря в среде с Рэлеевским механизмом энерговыделения..... 59
- 3 *В.В. Кучинский, А.Б. Никитенко, В.С. Первухин, И.В. Трофимов* (ОАО «НИПГС», ХК «ЛЕНИНЕЦ», Санкт-Петербург)
Численное решение задачи Коши для уравнений в частных производных первого порядка методом характеристик и трехжидкостная модель плазмы..... 60
- 4 *А.В. Корабельников, В.В. Кучинский, И.В. Тимофеев, Ю.В. Солодкин* (ОАО «НИПГС», ХК «ЛЕНИНЕЦ», Санкт-Петербург)
Влияние распределения по поверхности внешнего теплового потока на работу системы активной тепловой защиты летательного аппарата..... 62
- 5 *В.В. Кучинский, А.Б. Никитенко, В.С. Первухин, И.В. Трофимов, Ю.Н. Филимонов* (ОАО «НИПГС», ХК «ЛЕНИНЕЦ», Санкт-Петербург)
Оценка изменения параметров плазмы продуктов сгорания при прохождении акустических волн с использованием приближенного решения уравнений трхжидкостной модели плазмы..... 63
- 6 *Е.А. Власов, А.Ю. Постнов, А.Н. Прокопенко* (Санкт-Петербургский Государственный Технологический институт), *А.В.Корабельников, А.Л. Куранов*. (ОАО «НИПГС», ХК «ЛЕНИНЕЦ», Санкт-Петербург)
Проблемы катализа при получении водорода..... 65
- 7 *А.С. Петраченкова, Д.Н.Котов, Е.И. Лавринец, А.Ю. Постнов* (Санкт-Петербургский Государственный Технологический институт)
Термодинамическое обоснование выбора сырья для топливных элементов..... 67
- 8 *Д.В. Хмара, Ю.Ф. Колесниченко* (Институт Высоких Температур РАН, Москва)
Программный пакет для моделирования кинетических процессов и эмиссионных спектров в газоразрядной плазме..... 69

CONTENTS:

1	<i>A.V. Korabelnikov, A.L. Kuranov</i> (Hypersonic Systems Research Institute of the Leninetz Holding Company, St. Petersburg) HSRI Works in the Domain of Thermal Protection and Fuel Transformation. Accomplishments and Prospects.....	11
2	<i>B.V. Farmakovskiy, T.S. Vinogradova</i> (CSRI «Promethee», St. Petersburg), <i>A.V. Korabelnikov, A.L. Kuranov</i> (Hypersonic Systems Research Institute of the Leninetz Holding Company, St. Petersburg) Development and Investigation of Catalytic Nanomaterials with Amorphous and Microcrystalline Structure for Steam Hydrocarbon Conversion.....	13
3	<i>E.A. Vlasov, N.V. Maltseva, A.Yu. Postnov, A.N. Prokopenko</i> (Saint-Petersburg State Technological Institute) Suspension Method of Synthesis for the Catalysts of Steam Hydrocarbon Reforming.....	14
4	<i>S. Leonov, D. Yarantsev</i> (IVTAN, Moscow), <i>A. Napartovich, I. Kochetov</i> (TRINITI, Moscow) Plasma-Chemical Reforming of Hydrocarbon Fuel Inflow.....	17
5	<i>A.V. Korabelnikov, A.L. Kuranov, A.V. Fedotov</i> (Hypersonic Systems Research Institute of the Leninetz Holding Company, St. Petersburg) Numerical Simulation of the Planar TCR with Two Walls of the Finite Thickness...	19
6	<i>Ye.A. Meshcheryakov, A.F. Chevagin, V.P. Starukhin</i> (TsAGI, Moscow) Computational analysis of the characteristics of a high-speed straight flow two-mode combustion chamber operating on hydrocarbon fuel in the oxygen conversion regime.....	20
7	<i>O.V. Voloshchenko, S.A. Zosimov, A.A. Nikolaev, V.N. Ostras, V.N. Sermanov, A.F. Chevagin</i> (TsAGI, Moscow) Investigation of the working process in a high-speed straight-flow combustion chamber with thermochemical preparation of hydrocarbon fuel.....	21
8	<i>A.L. Kuranov</i> (Hypersonic Systems Research Institute Holding company "Leninetz", St-Petersburg), <i>A.A. Kudryavtsev, E.A. Bogdanov</i> (St-Petersburg state university), <i>V.L. Bychkov, A.Yu. Lomteva</i> (M.V. Lomonosov Moscow state university) Basic research of air-hydrocarbon mixture ionization processes for optimization of ignition in combustion chambers at application of gas discharges.....	22
9	<i>A. Klimov, V. Bitiurin, I. Moralev, B. Tolkunov</i> (Institute for High Temperature RAS, Moscow), <i>A. Nikitin, A. Velichko</i> (Institute of Physics and Chemistry RAS, Moscow), <i>Yu. Lebedev, I. Bilera</i> (Institute of Petrochemical Synthesis RAS, Moscow) Non-Premixed Plasma-Assisted Combustion in High-Speed Airflow.....	24
10	<i>V. Kochetov, S. B. Leonov</i> (IVTAN, Moscow), <i>A. P. Napartovich</i> (TRINITI, Moscow) Numerical evaluations of plasma ignition in supersonic flow of mixtures of hydrogen or ethylene with air.....	26
11	<i>A.F. Aleksandrov, A.P. Ershov, S.A. Kamenshikov, E.B. Kolesnikov, A.A. Logunov, V.A. Chernikov, V.M. Shibkov</i> (Physical department M.V. Lomonosov MSU, Moscow) On a possibility of pulsed plasma jet application to ignition of propane-air mixture	28
12	<i>V.Yu. Velikodnyi, V.P. Vorotilin, A.V. Ereemeev, L.KK. Nikitenko Yu.G. Yanovskii</i> (Institute of applied mechanics RAS, Moscow), <i>A.F. Aleksandrov, V.L. Bychkov, I.B. Timofeev</i> , <i>V.A. Chernikov</i> (M.V. Lomonosov Moscow state university), <i>D. VanWie</i> (The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory) Experimental and theoretical investigation of "activated porous fuel" ignition processes.....	29
13	<i>Yu.L. Serov</i> (Ioffe Institute RAS, St.-Petersburg) Plasma detonation at supersonic movement in gas-plasma medium.....	32

- 14 *S.V.Bobashev, A.V.Erofeev, T.A.Lapushkina, S.A.Poniaev, R.V.Vasil'eva, B.G.Zhukov* (Ioffe Physico-Technical Institute Russian Academy of Sciences, St.Petersburg)
Gas discharge air plasma in supersonic MHD channel..... 34
- 15 *E.G. Sheikin* (Hypersonic Systems Research Institute Holding company "Leninetz", St-Petersburg)
Calculation of Conductivity Sustained by Electron Beam in MHD Flow Control Applications..... 35
- 16 *V.A. Bityurin, A.N. Bocharov, D.S. Baranov* (IVTAN, Moscow), *A.V. Krasilnikov, Yu.A. Plastinin* (TsNIIMash, Korolev, Moscow region)
MHD Flow Control..... 36
- 17 *Doyle Knight and Hong Yan* (The State University of New Jersey, Piscataway, NJ), *Taylor Swanson, Greg Elliott, and Nick Glumac* (University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL)
Interaction of Pulsed Energy Deposition with a Normal Shock: Experimental and Computational Investigation..... 36
- 18 *Yu. Kolesnichenko, D. Khmara* (Institute of High Temperatures RAS, Moscow), *Doyle Knight* (Rutgers University, New Brunswick, NJ)
A Kinetic Model of Microwave Energy Deposition in Air..... 37
- 19 *Kirill V. Khodataev* (UFSF "Moscow Radiotechnical Institute of RAS", Moscow)
Weak detonation wave ignition and sustaining in over CJ-speed flow by means of undercritical microwave discharge..... 39
- 20 *Datta Gaitonde, Miguel Visbal, and Subrata Roy*
Control of Flow Past a Wing Section with Plasma-based Body Forces..... 40
- 21 *V.A. Lashkov, I.Ch. Mashek, Yu.I. Anisimov, V.I. Ivanov* (St-Petersburg State University), *Yu.F. Kolesnichenko* (Institute of High Temperatures RAS, Moscow), *O.A. Azarova* (Computing Centre of Russia Academy of Sciences, Moscow)
Combination of Gas Injection and MW Discharge for Drag Reduction under Supersonic Flight..... 41
- 22 *V.M.Shibkov, A.D.Abramova, A.F.Aleksandrov, V.A.Chernikov, A.P.Ershov, A.A.Karachev, R.S.Konstantinovskij, L.V.Shibkova, V.V.Zlobin* (Physical Faculty of the Moscow State University)
Microwave Discharges in High-Speed Flow: Fundamentals and Application..... 43
- 23 *V.A Sakharov, N.P. Mende, S.V. Bobashev* (A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of Russian Academy of Sciences Saint-Petersburg) *D. M. Van Wie* (Johns Hopkins University, U.S.A)
An Electromagnetic Facility for Producing an Impact on a Supersonic Flow about a Body of Revolution..... 45
- 24 *Yu. Kolesnichenko, D. Khmara* (Institute of High Temperatures RAS, Moscow)
Kinetic Modeling of MW Field Interaction with Decaying Laser Spark in Air..... 46
- 25 *I.I. Lipatov* (TsAGI, Zhukovsky-3, Moscow region)
Asymptotical models of boundary layer flow control..... 48
- 26 *I.I. Esakov* (FSUE «Moscow radiotechnical institute RAS»), *V.L.Bychkov, L.P.Grachev, K.V.Khodataev* (M.V. Lomonosov Moscow state university)
Features of microwave streamer discharge in air at its different humidity and at presence of water aerosol..... 50
- 27 *N.A. Gerasimov, V.S. Sukhomlinov, S.V. Sukhomlinov* (St-Petersburg State University), *V.V. Kuchinskiy* (Hypersonic Systems Research Institute of the Leninetz Holding Company, St. Petersburg)
Shock Wave Propagation in the Medium with the Rayleigh Mechanism of Energy Release..... 51
- 28 *Jonathan Poggie* (Air Force Research Laboratory)
DC Glow Discharges: A Computational Study for Flow Control Applications..... 53

- 29 *Alexander V. Likhanskii, Mikhail N. Shneider, Sergey O. Macheret, and Richard B. Miles* (Princeton University, Princeton, New Jersey)
Numerical Modeling of Plasma Actuator..... 55
- 30 *I.Ch. Mashek, V.A. Lashkov, Yu.I. Anisimov* (St-Petersburg State University)
Yu.F. Kolesnichenko (Institute of High Temperatures RAS, Moscow)
Hypersonic Plasma Jets Generated by Quasi-Stationary Magneto – Plasma Compressor and Their Applications for Applied Plasma dynamics..... 56

Authors Post Papers

- 1 *V. Brovkin, Yu. Kolesnichenko, D. Khmara*, (IHT RAS, Moscow), *I. Mashek, V. Lashkov* (St.-Petersburg State University)
Investigation of laser-induced microwave discharge in air..... 58
- 2 *N.A. Gerasimov, V.S. Sukhomlinov, S.V. Sukhomlinov* (St-Petersburg State University)
Vortex Dynamics in the Medium with the Rayleigh Mechanism of Energy Release.. 59
- 3 *V.V. Kuchinskiy, A.B. Nikitenko, V.S. Pervukhin, I.V. Trofimov* (Hypersonic Systems Research Institute of the Leninetz Holding Company, St. Petersburg)
Numerical Solution of Cauchy Problem for Equations in Partial First-Order Derivatives by Characteristics Method and Three-Liquid Plasma Model..... 60
- 4 *A.V. Korabelnikov, V.V. Kuchinskiy, I.V. Timofeev, Yu.V. Solodkin* (Hypersonic Systems Research Institute of the Leninetz Holding Company, St. Petersburg)
Effect of Surface Distribution of the External Flux upon FV Active Thermal Protection System Operation..... 62
- 5 *V.V. Kuchinskiy, A.B. Nikitenko, V.S. Pervukhin, I.V. Trofimov, Yu.N. Filimonov* (Hypersonic Systems Research Institute of the Leninetz Holding Company, St. Petersburg)
Assessment of Parameter Variations for Plasma Combustion Yields at Acoustic Waves Propagation Using Approximate Solution of Equations for Three-Liquid Plasma Model..... 63
- 6 *E.A. Vlasov, A.Yu. Postnov, A.N. Prokopenko* (Saint-Petersburg State Technological Institute), *A.V. Korabelnikov, A.L. Kuranov* (Hypersonic Systems Research Institute of the Leninetz Holding Company, St. Petersburg)
The Problems of Catalysis at Hydrogen Production..... 66
- 7 *A.S. Petrachenkova, D.N. Kotov, E.I. Lavrinets, A.Yu. Postnov* (Saint-Petersburg State Technological Institute)
Thermodynamic Justification of the Feedstock Selection for the Fuel Elements..... 68
- 8 *Yu. Kolesnichenko, D. Khmara* (Institute of High Temperatures RAS, Moscow)
Software package for kinetic and spectra emission modeling of gas discharge plasma..... 70

1. РАБОТЫ ОАО «НИПГС» В ОБЛАСТИ ТЕПЛОЗАЩИТЫ И ПРЕОБРАЗОВАНИЯ ТОПЛИВА. ДОСТИЖЕНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ.

А.В. Корабельников, А.Л. Куранов
ОАО «НИПГС» ХК «Ленинец», Санкт-Петербург

В работе рассмотрены основные научно-технические проблемы разработки утилизации тепла и конверсии углеводородного топлива применительно к энергетическим и двигательным установкам различного назначения. Проведенный цикл расчетно-теоретических и экспериментальных исследований заложил базис для решения многих задач, стоящих перед разработчиками системы активной тепловой защиты и преобразования топлива ГЛА на углеводородном топливе.

В ходе выполнения работы

- проведен анализ типов эндотермических процессов (термические и каталитические), различающихся по скорости, тепловому эффекту и составу получаемых продуктов;
- разработана двухступенчатая схема конверсии жидких углеводородов;
- сформулированы требования к бортовым катализаторам и термохимическим реакторам как элементам конструкции транспортных средств;
- выделены типы катализаторов (планарные и каркасные), использование которых в реакторах тепловой защиты позволит сделать их конструкций легкими, прочными, имеющими малое гидравлическое сопротивление и высокие тепломассообменные характеристики;
- разработаны основы технологии газотермического и холодного газодинамического напыления каталитических покрытий;
- проведены расчеты отдельных термохимических реакторов и их систем с помощью разработанных алгоритмов и программ;
- обобщены результаты многочисленных лабораторных и стендовых испытаний термохимических реакторов, показывающие возможность термохимического преобразования исходного топлива с разной степенью конверсии и в широком диапазоне тепловых нагрузок.

Дальнейшие перспективы работы связаны с получением из исходного углеводородного топлива смесей различного состава и изучением процессов их горения, использованием в качестве катализаторов металлов и сплавов с аморфной, микрокристаллической и нанокристаллической структурами, а также с расширением круга рассматриваемых эндотермических реакций и условий их проведения в различных энергетических и двигательных установках.

1. WORKS BY HSRI [NIPGS] IN THE SPHERE OF THERMAL PROTECTION AND FUEL MODIFICATION. ACCOMPLISHMENTS AND PERSPECTIVES.

Korabelnikov, A.V., Kuranov, A.L.
*Hypersonic Systems Research Institute of the Leninetz Holding Company,
 St. Petersburg*

In this paper basic scientific and technical problems associated with heat utilization and hydrocarbon fuel conversion as applied to energy and propulsion systems of various designations are reviewed. The conducted cycle of computation-theoretical and experimental investigations laid the groundwork for solution of many problems facing the developers of active thermal protection and hydrocarbon fuel transformation system of hypersonic flight vehicle. In the process of work the following was done:

- analysis of endothermic process types (thermal and catalytic) that differ in velocities, thermal effect and obtained product compositions has been performed;
- two-stage scheme of liquid hydrocarbon conversion was developed;
- requirements to the on-board catalysts and thermochemical reactors as structural components of transport vehicle were formulated;
- catalyst types (planar and frame) have been identified; their usage with the reactors of thermal protection will help make their structures more light and durable, possessing low pressure loss and high thermal-and-mass-exchange characteristics;
- foundations of gasthermal and cold gasdynamic spraying techniques for catalytic coats have been developed;
- computations of some thermochemical reactors and their systems utilizing algorithms and programs developed have been carried out;
- the results of numerous laboratory and bench tests of thermochemical reactors proving feasibility of thermochemical transformation of the basic fuel with various conversion degree and in a wide range of thermal loads have been generalized.

Further work perspectives are associated with the production from basic hydrocarbon fuel of different composition mixtures and study of their combustion processes, utilization of metals and alloys with amorphous, microcrystalline and n-phase structures in the capacity of catalysts, as well as expansion the range of endothermic reactions under consideration and conditions of their running in various energy and propulsion systems.

2. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ КАТАЛИТИЧЕСКИХ НАНОМАТЕРИАЛОВ С АМОРФНОЙ И МИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКОЙ СТРУКТУРОЙ ДЛЯ ПАРОВОЙ КОНВЕРСИИ УГЛЕВОДОРОДОВ

Б. В. Фармаковский*, Т. С. Виноградова*, А.В.Корабельников,
А.Л.Куранов****

** Федеральное государственное унитарное предприятие Центральный научно-исследовательский институт конструкционных материалов "Прометей",
Санкт-Петербург*

***ОАО «НИПГС» ХК «Ленинец», Санкт-Петербург*

Технология получения высокопористого каталитического носителя для паровой конверсии топлива заключается в нанесении порошковой композиции, состоящей из алюминия, гидроксида алюминия и промотирующих добавок на металлическую подложку. Сложные металл-оксидные системы Al/Ni/Cr/ΣРЗМ, имеющие аморфную и микрокристаллическую структуру, проявляют высокую каталитическую активность в реакциях каталитического окисления метана. Каталитическая активность аморфных сплавов изменяется в широких пределах, зависит от их химического состава и часто усиливается при благоприятном легировании и активации поверхности. Например, для повышения эффективности аморфных катализаторов системы никель-алюминий производили холодное газодинамическое напыление смеси никеля и соединений алюминия и химическое растворение алюминия в растворе КОН, что приводило к увеличению шероховатости и общей площади поверхности. Практический интерес представляет введение в каталитическую композицию различных порообразующих соединений, и, как следствие, увеличение удельной поверхности и каталитической активности образцов.

Избыточная энергия аморфного состояния металлических сплавов по сравнению с кристаллическим состоянием предопределяет повышенную каталитическую активность аморфных сплавов в ряде процессов окисления. Природа активных центров на

поверхности аморфных сплавов еще однозначно не установлена. Предполагается, что активные центры кристаллических и аморфных катализаторов идентичны, так как энергия активации расщепления связи C-O составляет 100 ± 4 кДж/моль, независимо от состава сплава и его состояния (кристаллическое, аморфно-кристаллическое, аморфное).

В виду отсутствия систематических исследований влияния изменений исходной аморфной структуры на активность, нами рассмотрена активность кристаллических и аморфных катализаторов одной и той же системы, полученных различными методами, показана перспективность использования комбинированных методов нанесения функциональных покрытий каталитического класса. Оптимизация химического состава и стабилизация аморфного состояния позволят наиболее полно использовать высокую плотность активных центров, большую удельную поверхность аморфных сплавов, их значительную прочность и вязкость для регулирования каталитической активности и теплопроводности планарных катализаторов.

2. DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF CATALYTIC N-MATERIALS WITH AMORPHOUS AND MICROCRYSTALLINE STRUCTURES FOR STEAM HYDROCARBON CONVERSION

Farmakovsky, B.V*., Vinogradova, T.S*., Korabelnikov, A.V., Kuranov, A.L**.**

**"Prometheus" Federal State Unitary Enterprise (FGUP) TsNII KM, St. Petersburg*

***Hypersonic Systems Research Institute of the Leninetz Holding Company, St. Petersburg*

Production technique for highly porous catalytic carrier required for steam fuel conversion is in application of powder composition consisting of aluminum, aluminum hydrate and promoting additives onto metallic substrate. Complex metal-oxide systems Al/Ni/Cr/ Σ REM with amorphous and microcrystalline structures display high catalytic activity in the reactions of methane catalytic oxidation. Catalytic activity of amorphous alloys can vary in a wide range depending on their chemical composition and tend to frequently increase with favorable alloying and surface activation. For example, in order to increase efficiency of amorphous catalysts of Ni-Al system, cold gasdynamic spraying of nickel and aluminum compounds mixture has been performed followed by chemical dissolution of aluminum in KOH solution, the result being increase in surface roughness and its total area. Of a practical interest is introduction into catalytic composition of various pore-forming compounds and, as a consequence, increase of specific surface and the samples catalytic activity.

Excessive energy of metallic alloys amorphous state as compared to crystalline state pre-determines high catalytic activity of the amorphous alloys in a number of oxidation processes. The nature of active centers on the amorphous alloys surface has not been established for a certainty as yet. It is suggested that active centers of crystalline and amorphous catalysts are identical as activation energy of C-O bond cleavage makes $100 \pm$ KJ/mol irrespective of the alloy composition and its state (crystalline, amorphous-crystalline, amorphous).

Due to the lack of systematic investigations on the effect of the initial amorphous structure variations upon activity we have considered activity of crystalline and amorphous catalysts of the same system that were obtained by different techniques and indicated the prospects of using combined methods of functional catalytic coating. Optimization of chemical composition and stabilization of amorphous state would allow usage to the fullest degree possible of the high density of active centers, large specific surface of amorphous alloys, their significant strength and viscosity required for control of catalytic activity and heat conductivity of planar catalysts.

3. СУСПЕНЗИОННЫЙ МЕТОД СИНТЕЗА КАТАЛИЗАТОРОВ ПАРОВОЙ КОНВЕРСИИ УГЛЕВОДОРОДОВ

Е.А.Власов, А.Ю.Постнов, Н.В.Мальцева, А.Н.Прокопенко
Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(Технический университет)

Решаемая в настоящее время задача создания энергетических установок малой единичной мощности, работающих на различном углеводородном сырье, по ряду причин не позволяет использовать существующие катализаторы конверсии. Вновь создаваемые каталитически активные композиты должны обладать рядом уникальных характеристик и, в первую очередь, обеспечивать высокую активностью в широком интервале температур при конверсии жидких и газообразных углеводородов. Опыт эксплуатации катализаторов нанесенного типа, полученных с применением различных нанотехнологий, показывает, что основная проблема заключается не в выборе каталитически активной композиции, а в закреплении композита на поверхности металлического носителя. Основная причина снижения активности таких катализаторов обусловлена разрушением слоя активного компонента под воздействием окислительной среды и высокой температуры, что объясняется различными коэффициентами температурного расширения подложки и нанесенного композита. Прогресс в решении данной проблемы может быть достигнут при использовании катализаторов с вторичным носителем, который выполняет роль демпфера между металлической основой и активным компонентом.

Технология создания катализатора методом суспензионного нанесения включает в себя три основные стадии:

1. Подготовка и активация металлического носителя - гофрированной ленты из сплава X15Ю5.
2. Нанесение суспензии вторичного носителя, приготовленной методом механо-химической активации и последующая термообработка. Основу суспензии составляют различные модификации оксида алюминия с термостабилизирующими и структурообразующими добавками.
3. Введение никельсодержащего соединения и термообработка катализатора.

Для оптимизации структуры и прочностных характеристик композита, состоящего из первичного и вторичного носителей, проведены исследования, которые позволили установить корреляцию между реологическими показателями суспензий вторичного носителя и характеристиками синтезированных композитов. Определены минимальные значения величины сдвигающего напряжения, при которых гарантируется наилучшее контактирование разжиженной суспензии и активированной поверхности первичного носителя. Рентгенофазовым анализом установлено, что требуемые прочностные характеристики композитов определяются химическим взаимодействием составляющих первичного и вторичного носителей.

Определены показатели активности синтезированных катализаторов в зависимости от состава вторичного носителя и условий нанесения и термообработки суспензий. Установлено, что использование разработанных катализаторов позволяет обеспечивать степень конверсии метана на уровне 80-90% от равновесного значения.

3. SUSPENSION SYNTHESIS TECHNIQUE FOR CATALYSTS OF STEAM HYDROCARBON CONVERSION

Vlasov Ye.A., Postnov A.Yu., Maltseva N.V., Prokopenko A.N.
St. Petersburg state technological institute (Engineering University)

The problem of production for low unit power energy systems operating on various

hydrocarbon feedstock, presently under solution, for a number of reasons does not allow utilization of the existing conversion catalysts. Newly created catalytically active composites should possess many unique properties and, first of all, they are to ensure high activity in a wide temperature range at the conversion of liquid and gaseous hydrocarbons. Operating experience of the supported catalysts obtained by various n-technologies indicates that principal problem is not only one of catalytically active composition selection. It is mostly of a composite fixation on the surface of metallic carrier. The major cause of activity degradation for such catalysts is due to the active component layer destruction under high temperature and oxidizing medium because of different coefficients of thermal expansion for substratum and composite applied. Much progress toward the solution of this problem can be achieved by using catalysts with secondary carrier which serves as damper between metallic substrate and active component. Catalyst processing technique by suspension application consists of three basic stages:

1. Preparation and activation of metallic carrier – corrugated tape made of the alloy X15Ю5.
2. Suspension of the second carrier application prepared by mechanochemical activation and subsequent thermal treatment. Various modifications of alumina (Al_2O_3) with thermal stabilizing and structure-forming additives lie at the base of the suspension.
3. Introduction of nickeliferous compound and catalyst thermal treatment.

In order to optimize structure and strength characteristics of the composite consisting of the primary and secondary carriers, a number of investigations have been conducted which allowed establishment of correlation between rheological indices of suspensions for the secondary carrier and characteristics of synthesized composites. Minimal values of shift stress are identified under which the best quality of contact of liquefied suspension and activated surface of the primary carrier is guaranteed. It was established through X-ray phase analysis, that the required strength characteristics of composites are determined by chemical interaction for the components of the primary and secondary carriers. Activity indexes of synthesized catalysts depending on composition of the secondary carrier as well as on suspension application and thermal treatment conditions have also been defined. It was found that usage of the developed catalysts allows ensuring of methane conversion degree at a level of 80-90 % of equilibrium value.

4. ПЛАЗМО-ХИМИЧЕСКАЯ КОНВЕРСИЯ УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА В СКОРОСТНОМ ПОТОКЕ

С. Леонов, Д. Яранцев

ИВТАН, Москва

А. Напартович, И. Кочетов

ТРИНИТИ, Москва

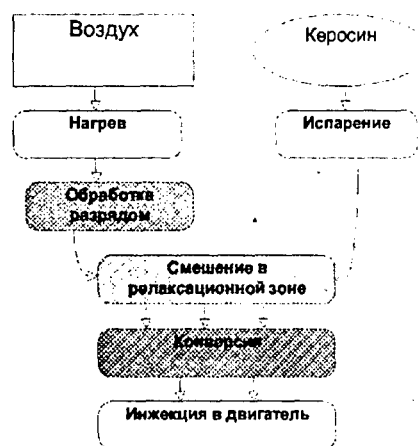
Данная работа посвящена проблеме улучшения процесса высокоскоростного горения. Использование традиционного авиационного топлива в газотурбинном (ТРД) и, тем более, прямоточном двигателе (ГПВРД) ограничено слишком большим временем инициации поджига и прохождения реакции горения в технически приемлемых условиях. Одним из разрабатываемых способов ускорения химических реакций является преобразование (конверсия) топлива. Среди известных методов конверсии топлива самым многообещающим, возможно, является плазменный метод. Тем не менее, вплоть до настоящего времени не было проведено ни полного аналитического рассмотрения, ни экспериментальной демонстрации преобразования тяжёлого углеводородного топлива с помощью плазмы элетрического разряда.

Идея "плазмо-индуцированного горения" содержит несколько важных частей: плазменный поджиг посредством химической активации окислителя и топлива, горение бедных смесей, интенсификация смешения, стабилизация фронта пламени, увеличение

полноты сгорания и т.д. [1-3]. Эта работа посвящена интенсификации горения с помощью преобразования топлива [4-7].

Известно несколько методов преобразования углеводородного топлива, такие как: барботаж, обработка ультразвуком, насыщение водородом, активация добавками, термо-химическая конверсия. Некоторые из них были протестированы более-менее успешно. Большинство из них основаны на разрушении тяжёлых молекул и/или высвобождении водорода. Глубоко преобразованное углеводородное топливо обладает не только гораздо более низким временем индукции, но и более высокой эффективностью в термодинамическом цикле с горением (более полное использование эксергии). Как правило, равновесное преобразование топлива не даёт большого выигрыша. Применение высоко-потенциальной мощности и неравновесных процессов может приводить к генерации большей доли возбуждённых радикалов и активных молекул с меньшей средней массой. Одним из таких методов является плазменное преобразование топлива, предлагаемое в этой работе.

Механизмы преобразования углеводородного топлива электрическими разрядами в высокоскоростном потоке могут быть перечислены следующим образом: быстрый локальный нагрев среды до высокой ($T \gg 2kK$) температуры; специфические химические реакции с неравновесно возбуждённым воздухом (в основном, с атомарным кислородом и оксидами азота); возбуждение, ионизация и диссоциация молекул электронным ударом; фото-диссоциация и ионизация; активация среды с помощью ударных волн, генерируемых импульсным или нестационарным электрическим разрядом. Упрощенная схема процесса плазменной конверсии показана на рисунке.



В работе описываются результаты расчетно-теоретического анализа и экспериментальная демонстрация эффекта неравновесной конверсии этилена и керосина в потоке. Среди первых отметим

следующие: анализ термодинамического цикла, расчётный анализ плазмо-химических процессов, моделирование поджига модифицированного топлива на базе редуцированного термо-химического кода, моделирование оптических спектров.

Экспериментальная установка разработана на основе опыта эксплуатации воздушно-керосинового плазменного генератора. Характеристики плазменного генератора по преобразованию топлива исследованы в зависимости от режимов работы и тестовых параметров. Измерены время индукции (автоподжиг в смеси с воздухом) модифицированного топлива и проведено сравнение его с первоначальной величиной при той же температуре. Проведен упрощенный химический анализ продуктов плазменной конверсии.

Литература:

1. L. Jacobsen, C. Carter, R. Baurie, T. Jackson "Plasma-Assisted Ignition in Scramjet", AIAA-2003-0871, 41st AIAA Aerospace Meeting and Exhibit, 6-9 January, Reno, NV, 2003.
2. S. Leonov, V. Bityurin, A. Bocharov, K. Savelkin, D. VanWie, D. Yarrantsev, "Hydrocarbon Fuel Ignition in Separation Zone of High Speed Duct by Discharge Plasma", Proceedings of the 4rd Workshop "PA and MHD in Aerospace Applications", April, 2002, Moscow, IVTAN.
3. A. Napartovich, I. Kochetov, S. Leonov, "Study of dynamics of air-hydrogen mixture ignition by non-equilibrium discharge in high-speed flow", J. of High Temperature (rus), No. 5, 2005, p.667.
4. Philippe Dagaut, Michel Cathonnet "The ignition, oxidation, and combustion of

kerosene: A review of experimental and kinetic modeling", *Progress in Energy and Combustion Science*, 32 (2006) 48–92, www.elsevier.com/locate/peccs

5. M. Filippi, C. Bruno, and P. Czysz "Reforming and pyrolysis of liquid hydrocarbons and partially oxidised fuel for hypersonic propulsion", 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA Paper-2000-3619.

6. E. Eremin, "Elements of gas electrochemistry", (rus) Moscow State University, M., 1998.

4. PLASMA-CHEMICAL REFORMING OF HYDROCARBON FUEL INFLOW

S. Leonov, D. Yarantsev

IVTAN, Moscow

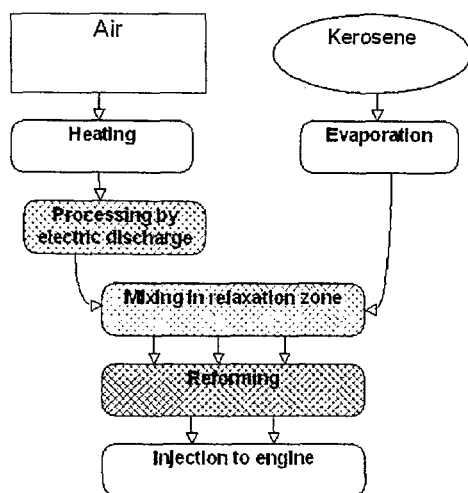
A. Napartovich, I. Kochetov

TRINITI, Moscow

The work is aimed an enhancement of high-speed combustion process. Utilizing of conventional avionic fuel in scramjet is limited by too long time for ignition and combustion under technically reasonable conditions. One of contrived ways is the fuel reforming. Among known methods of fuel reforming and modification a plasma method, probably, is the most promising. However up to now there was no neither complete analytical considering nor experimental demonstration of heavy hydrocarbon fuel reforming by means of plasma of electrical discharge.

Well known idea of the "plasma-assisted combustion" contains several important domains: plasma-induced ignition due to chemical activation of oxidant and fuel, combustion of lean mixtures, mixing intensification, flame-holding, completeness enhancement, etc. [1-3]. This work is devoted to problem of combustion intensification due to fuel reforming [4-7].

Several methods of hydrocarbon fuel modification and reforming are known: barbotage, ultrasonic treatment, saturation by hydrogen, activation by additives, thermo-chemical conversion. Some of them are tested more-less successfully. The most of them are based on heavy molecules breakage and/or hydrogen release. A deeply converted hydrocarbon fuel possesses not only much lower induction time but also more effective potential in thermodynamic combustion cycle (more complete exergy utilization). As a rule the equilibrium transformation of the fuel doesn't give a large benefit. Utilizing of high-potential (high-density) power deposition could lead to generation of bigger share of excited radicals and low-mass active molecules. One of such methods is a plasma's reforming of the fuel, proposed for this work.



The mechanisms of the plasma reforming of the hydrocarbon fuel by electrical discharges in high-speed flow can be considered and listed as following: fast local superheating of the considered and listed as following: fast local superheating of the medium; specific chemical reactions with highly excited air (atomic oxygen and nitrogen oxides, mainly); molecules' strong excitation, ionization and dissociation by electron impact; photo dissociation and ionization; medium activation due to shock waves generated by pulse or unsteady electric discharge. A simplified scheme of plasma reforming processes is shown in the figure. The work considers theoretical analysis and experimental demonstration of the effect of nonequilibrium conversion of ethylene and kerosene in flow. In the first field are the following ones:

thermal cycling analysis, computational analysis of plasma-chemical processes, simulation of modified fuel ignition on base of reduced thermo-chemical code, optical spectrum simulation.

The experimental facility is designed and assembled on the base of experience in exploiting

of the kerosene-air plasma generator. A performance of plasma generator to fuel reforming is being studied in dependence on operation modes and test parameters. The induction time of self-ignition at mixing with air of modified fuel is measured and compared with initial value under the same temperature. A simplified chemical analysis of products is fulfilled.

References:

1. L. Jacobsen, C. Carter, R. Baurie, T. Jackson "Plasma-Assisted Ignition in Scramjet", AIAA-2003-0871, 41st AIAA Aerospace Meeting and Exhibit, 6-9 January, Reno, NV, 2003.
2. S. Leonov, V. Bityurin, A. Bocharov, K. Savelkin, D. VanWie, D. Yarrantsev, "Hydrocarbon Fuel Ignition in Separation Zone of High Speed Duct by Discharge Plasma", Proceedings of the 4rd Workshop "PA and MHD in Aerospace Applications", April, 2002, Moscow, IVTAN.
3. A. Napartovich, I. Kochetov, S. Leonov, "Study of dynamics of air-hydrogen mixture ignition by non-equilibrium discharge in high-speed flow", J. of High Temperature (rus), No. 5, 2005, p.667.
4. Philippe Dagaut, Michel Cathonnet "The ignition, oxidation, and combustion of kerosene: A review of experimental and kinetic modeling", Progress in Energy and Combustion Science, 32 (2006) 48–92, www.elsevier.com/locate/peccs
5. M. Filippi, C. Bruno, and P. Czyst "Reforming and pyrolysis of liquid hydrocarbons and partially oxidised fuel for hypersonic propulsion", 36th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit, AIAA Paper-2000-3619.
6. E. Eremin, "Elements of gas electrochemistry", (rus) Moscow State University, M., 1998.

5. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ПЛОСКОГО ТХР С ДВУМЯ СТЕНКАМИ КОНЕЧНОЙ ТОЛЩИНЫ

А.В. Корабельников, А.Л. Куранов, А.В. Федотов
ОАО «НИПГС» ХК «Ленинец», Санкт-Петербург

Тепловая защита теплонапряженных частей гиперзвукового летательного аппарата (ГЛА), движущегося в плотных слоях атмосферы с гиперзвуковой скоростью, является в настоящее время одной из наиболее актуальных задач. В ГЛА по концепции «Аякс» предполагается, что в наиболее теплонапряженных частях планера и двигателя размещаются каталитические термохимические реакторы (ТХР), в которых будут осуществляться эндотермические процессы разложения исходного углеводородного топлива, в частности, паровая конверсия метана и его жидких гомологов.

В настоящей работе проведено численное исследование плоского ТХР с учетом сопряженного теплообмена между стенками конечной толщины и газовой смесью в проточной части реактора. Описана задача о течении химически реагирующей смеси в ТХР и поставлена задача теплопроводности в стенках ТХР с коэффициентом теплопроводности, зависящим от температуры. На основе разработанных алгоритмов и программ осуществлены многопараметрические численные исследования эффективности работы ТХР. Показано, что учет сопряженного теплообмена снижает характеристики ТХР по утилизации теплового потока в рассчитанной конфигурации реактора на 20%. Детальное рассмотрение зависимости процессов теплообмена от величины входной температуры в ТХР позволило сделать вывод, что газовая смесь с $T_{вх} = 400^\circ\text{C}$ способна поглощать большие тепловые потоки, а смесь с $T_{вх} = 700^\circ\text{C}$ обеспечивает на выходе ТХР большую величину мольных концентраций водорода и окиси углерода. Необходимо отметить, что плоский ТХР может служить эффективным устройством для охлаждения теплонапряженных поверхностей и обеспечивать на выходе из него мольную концентрацию водорода 0,4 – 0,5.

5. NUMERICAL MODELING OF PLANAR TCR WITH TWO WALLS OF THE FINITE THICKNESS

Korabelnikov A.V., Kuranov A.L., Fedotov A.V.

*Hypersonic Systems Research Institute of the Leninetz Holding Company,
St. Petersburg*

Thermal protection of the heat-stressed parts of a hypersonic flight vehicle (HFV) moving in the dense atmosphere with hypersonic velocity is at present one of the most pressing problems. In the HFV under Ajax concept it is assumed that in the most heat-stressed parts of airframe and engine, catalytic thermochemical reactors (TCR) are placed wherein endothermic processes of the initial hydrocarbon fuel decomposition will be realized, and particularly, steam methane reforming as well as its liquid homologues conversion.

In this paper numerical investigation of a planar TCR has been carried out with consideration for conjugate heat exchange between the walls of the finite thickness and gas mixture in the flow part of the reactor. The problem on the reactant mixture flow in TCR is described and the problem on heat conduction in TCR' walls with thermal conductivity coefficient depending on temperature is stated. On basis of algorithms and programs developed, multi-parametrical numerical investigations of TCR operational efficiency have been performed. It was shown that conjugate heat exchange decreases TCR capacity for utilization of heat flux in design TCR configuration by 20 %. Further consideration of heat exchange process dependencies on the quantity of TCR input temperature allowed to draw a conclusion that gas mixture at $T_{in} = 400^\circ \text{C}$ is capable of absorbing large heat fluxes and the mixture at $T_{in} = 700^\circ \text{C}$ ensures high mole concentration of hydrogen and carbon oxide at the TCR' outlet. It is worth mentioning that a planar TCR may prove to be very efficient device for cooling of heat-stressed surfaces and ensuring hydrogen mole concentration within 0.4 – 0.5 range at the reactor's outlet.

6. РАСЧЕТНЫЙ АНАЛИЗ ХАРАКТЕРИСТИК ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПРЯМОТОЧНОЙ ДВУХРЕЖИМНОЙ КАМЕРЫ СГОРАНИЯ, РАБОТАЮЩЕЙ НА УГЛЕВОДОРОДНОМ ТОПЛИВЕ В РЕЖИМЕ КИСЛОРОДНОЙ КОНВЕРСИИ

Е.А. Мещеряков, А.Ф. Чевагин, В.П. Старухин

ЦАГИ, Москва

Разработан квазиодномерный метод расчета течения в высокоскоростной прямоточной двухрежимной камере сгорания и проведены расчеты тягово-экономических характеристик (ТЭХ) двигателя, работающего на керосине с коэффициентом избытка окислителя $\alpha=1$, в широком диапазоне начальных и полетных чисел M_n ($M_{n \text{ нач.}}=3\div 6$; $M_n=3\div 12$). Метод основан на численном интегрировании уравнений сохранения в сочетании с процедурой глобальных итераций, с учетом конечных скоростей химических реакций, трения и теплоотвода на стенках канала.

Проанализированы возможности форсирования тяги двухрежимного двигателя с помощью дополнительной подачи кислорода в камеру сгорания в режиме предварительной керосино-кислородной конверсии в автономном газогенераторе (с $\alpha_{\text{гг}} \ll 1$) и при прямом вдуве кислорода в камеру. Кислородное форсирование работы двигателя значительно (в 1,65±2 раза) повышает коэффициент тяги двигателя при одновременном снижении его удельного импульса. Форсирование тяги целесообразно на стадии разгона ЛА и вывода его на марш.

Предварительная кислородная конверсия керосина позволяет заметно расширить

пределы самовоспламенения горючей смеси в камере сгорания в сторону меньших чисел M_H вплоть до $M_H=4$ и, тем самым, облегчить процесс пилотирования горения при наиболее трудных стартовых условиях.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 06-01-00318.

6. COMPUTATIONAL ANALYSIS OF THE CHARACTERISTICS OF A HIGH-SPEED STRAIGHT FLOW TWO-MODE COMBUSTION CHAMBER OPERATING ON HYDROCARBON FUEL IN THE OXYGEN CONVERSION REGIME

Meshcheryakov Ye.A., Chevagin A.F., Starukhin V.P.

TSAGI, Moscow

A quasi-one-dimensional method has been developed for predicting flow in a high-speed straight-flow combustion chamber and computations have been carried out of an engine operating on kerosene with an excess-oxidizer coefficient of $\alpha=1$ mixture a wide range of initial and cruise Mach numbers ($M_{in}=3...6$, $M_{cruise}=3...12$). The method is based on numerical integration equations in combination with a procedure of global iteration with regard to the finite rates of chemical reactions, friction and heat removal at the channel walls.

The fusibilities have been analyzed of thrust augmentation of a two-mode engine with the help of additional injection chamber in the regime of preliminary kerosene-oxygen conversion in an autonomous gas-generator (with $\alpha < 1$) and through direct injection of oxygen into the chamber. The oxygen-aided augmentation of the engine significantly increases the thrust coefficient (by a factor of 1.65...2) and simultaneously decreases its specific impulse. Thrust augmentation is advantageous during acceleration of the aircraft and its transition to the cruise regime.

The preliminary kerosene-oxygen conversion allows one to significantly enlarge the limits of self-ignition of the combustible mixture in the combustion chamber towards lower Mach number up to $M_H=4$ and thereby to simplify the process of combustion piloting at the most difficult star conditions.

This work has been carried out under RFFI financial support, Project N06-01-00318a.

7. ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА В ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ПРЯМОТОЧНОЙ КАМЕРЕ СГОРАНИЯ С ТЕРМОХИМИЧЕСКОЙ ПОДГОТОВКОЙ ЖИДКОГО УГЛЕВОДОРОДНОГО ТОПЛИВА

Волощенко О.В., Зосимов С.А., Николаев А.А., Острась В.Н., Серманов В.Н.,
Чевагин А.Ф.

ЦАГИ, Москва

Проведено экспериментальное исследование рабочего процесса в модельной ступенчатой камере сгорания (КС) с предварительной термохимической подготовкой топлива в автономном реакторе, работающем на керосине и воздухе.

Камера сгорания имела плоской канал с площадью входа 30x100 мм, состоящий из двух последовательно расположенных друг за другом, соединенных через ступеньку, участков.

В КС подавались продукты термохимической конверсии керосина с воздухом из автономного реактора нормально потоку через отверстия, расположенные на стенке в конце переднего участка перед уступом.

Рабочий процесс в газогенераторе-реакторе осуществляется по двухступенчатой схеме. В первой ступени за счет сжигания керосина в воздухе, подаваемых в газогенератор, осуществляется подогрев воздушного потока до $T_0=1500$ К. Во второй

ступени (реакторе) в высокотемпературный газовый поток, поступающий из первой ступени, подавался дополнительно керосин с $\alpha=0,1\dots0,4$ и осуществлялось термохимическое его разложение на высокоактивные горючие компоненты: H_2 , CO , CH_4 и др. Относительный весовой расход воздуха через газогенератор по отношению к расходу воздуха на входе в КС составлял 7%.

Исследовалось влияние на протекание, характеристики и эффективность рабочего процесса в КС коэффициентов избытка воздуха в реакторе и в КС, длины участка канала $F=const$ за уступом.

В результате исследования получено:

- при подаче в КС продуктов термического разложения керосина в воздухе при $\alpha=0,1\dots0,4$ и температуре в газогенераторе $T=1200\dots1800$ К происходит их самовоспламенение и в КС устанавливается устойчивый режим горения;

- горение продуктов термического разложения керосина первоначально происходит в конце переднего участка канала в области подачи с тепловым запирающим и образованием псевдоскачка выше по потоку;

- в заднем участке $F=const$ при $\alpha=1,5\dots2,5$ происходит догорание с полнотой сгорания $0,8\dots0,9$ и образованием течения типа псевдоскачка, а при $\alpha \geq 3$ реализуются сверхзвуковые режимы течения.

Проведенные исследования показали возможность использования предварительной термохимической подготовки жидкого углеводородного топлива в автономном реакторе для организации высокоэффективного рабочего процесса в камере сгорания, работающей при сверхзвуковой скорости и высокой энтальпии потока на входе.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 05-08-33604а.

7. INVESTIGATION OF THE WORKING PROCESS IN A HIGH-SPEED STRAIGHT-FLOW COMBUSTION CHAMBER WITH THERMOCHEMICAL PREPARATION OF HYDROCARBON FUEL.

Voloshchenko O.V., Zosimov S.A., Nikolaev A.A., Ostras V.N., Sermanov V.N.,
Chevagin A.F.
TSAGI, Moscow

An experimental investigation of a working process has been performed in a subscale stepped combustion chamber with a preliminary thermochemical preparation of fuel in a autonomous reactor operation on kerosene and air.

The combustion chamber had a 2D channel with an inlet area of 30x100 mm; consisting of two sections arranged one after another with step-like transition section. The combustion chamber was fed by products of thermochemical conversion of kerosene and air from the autonomous reactor normally to flow through holes located at the end of the section in front of the step.

The working process in the gas-generator is realized in a two-stage way. In the first stage, due to burning of kerosene in air being fed to the gas-generator of air flow is heated to $T_0=1500$ K. In the second stage (reactor) the high-temperature gas flow from the first stage received additionally kerosene with $\alpha=0,1\dots0,4$ whose thermochemical decomposition was performed there into combustible components: H_2 , CO , CH_4 , etc. The relative air flow through the gas-generator was 7% with respect to the air flow at the inlet of combustion chamber.

The influence has been studied of the air excess coefficients for the section with $F=const$ behind the step on the behavior, characteristics and effectiveness of the working process in the combustion chamber.

The flowing main findings can be summarized below:

- when supplying to the combustion chamber the products of thermal decomposition of kerosene in air at $\alpha=0,1\dots0,4$ and a temperature in the gas-generator within the range of

$T=1200\ldots 1800$ K, the self-ignition of the products takes place and a stable combustion process in the combustion chamber is established;

- the combustion of the products of kerosene thermal decomposition initially takes place at the end of the forward section of the channel in the region of kerosene supply with thermal choking and formation of an upstream pseudoshock;
- in the rear section ($F=\text{const}$) at $\alpha=1,5\ldots 2,5$ burning down takes place with a completeness of combustion of $0,8\ldots 0,9$ and formation of a pseudoshock-type flow, and at $\alpha \geq 3$ supersonic flow condition occur.

The investigation performed has shown the feasibility of using the preliminary thermochemical preparation of the liquid hydrocarbon fuel in an autonomous reactor for organizing a high effective working process in the combustion chamber with supersonic flow velocity and high flow enthalpy at the intake.

This work has been carried out under RFFI financial support, Project N05-08-33604a.

8. BASIC RESEARCH OF AIR-HYDROCARBON MIXTURE IONIZATION PROCESSES FOR OPTIMIZATION OF IGNITION IN COMBUSTION CHAMBERS AT APPLICATION OF GAS DISCHARGES

A.L. Kuranov

Hypersonic Systems Research Institute of Leninetz Holding company, St-Petersburg

A. A. Kudryavtsev, E.A. Bogdanov

St-Petersburg state university

V. L. Bychkov, A. Yu. Lomteva

M.V. Lomonosov Moscow state university

The presented work is devoted to analysis of effective ionization processes at early discharge stages in air – hydrocarbon mixtures at different temperatures and mixture compositions as the first necessary step before analysis of ionization moving air – hydrocarbon mixtures. Necessary parameters of excitation and ionization in these mixtures have been determined in wide range of E/N parameter (E -electric field strength, N - density of neutrals). So called, “thresholds” of ionization in these gas mixtures have been calculated. Experiments on measurements of “thresholds” of ionization in these mixtures are discussed.

9. ГОРЕНИЕ ПРЕДВАРИТЕЛЬНО НЕСМЕШАННОГО ТОПЛИВА В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ВОЗДУШНОМ ПОТОКЕ, СТИМУЛИРОВАННОЕ ПЛАЗМЕННЫМИ ОБРАЗОВАНИЯМИ

Климов А., Битюрин В., Моралев И., Толкунов Б.,* Никитин А., Величко А.,**

Лебедев Ю., Билера И., ++

**Институт высоких температур РАН, Москва*

***ИХФ РАН, Москва*

++ИНХС РАН, Москва

Стимулированное горение (СГ) углеводородного топлива в воздушном высокоскоростном потоке изучалось в наших предыдущих работах [1-7]. Эта работа является их продолжением.

Новые экспериментальные результаты по полноте СГ предварительно несмешанного топлива в высокоскоростном воздушном потоке рассматриваются в настоящей работе. Эксперименты по СГ проводились на установке НWT-1. Горячий воздушный поток ($M < 2$, $P_{st} < 1$ Бар, $T_{st} < 1000K$) использовался в рабочей камере этой установки. Комбинированный электрический разряд использовался для предварительного подогрева воздушного потока и для управления СГ. Методы оптической и ИК спектроскопии, химический анализ, скоростная цифровая камера использовались для изучения плазменных образований и СГ.

Следующие основные экспериментальные результаты были получены в этой работе:

1. Изучена динамика СГ предварительно несмешанного углеводородного топлива в вихревом и незакрученном воздушном потоках. Обнаружено, что зоне СГ могут образовываться долгоживущие плазмохимические структуры. Именно эти структуры позволяют значительно снизить электрическую мощность, потребляемую плазмогенератором в СГ эксперименте.
2. Состав финальных продуктов СГ измерен с помощью методов FTIR спектроскопии и хроматографии.
3. Эффективная наработка H_2 , CO , C_2H_2 , CH_4 , C_6H_6 ... в СГ зоне была обнаружена в богатых смесях (реформинг топлива).
4. Обнаружено, что высокая полнота СГ топлива 90-100% достигается в бедных смесях только. В случае богатых смесей эта величина может уменьшиться до 40%.
5. Детальные оптические спектры получены и проанализированы в различных сечениях СГ зоны. Получена важная информация о кинетике плазмохимических процессов в процессе СГ.
6. Важная роль гетерогенной кинетики СГ на поверхности заряженных возбужденных карбоновых кластеров (сажевых частиц) обсуждается в настоящей работе.
7. Расширение концентрационных пределов устойчивого СГ углеводородного топлива в 2-4 раза обнаружено в эксперименте.
8. Снижение температуры пламени в 2-3 раза зафиксировано в эксперименте в случае использования обедненных смесей при плазменном стимулировании их горения.

Литература:

1. Klimov A., Bityurin V., Kuznetsov A., Tolkunov B., Vystavkin N., Vasiliev M., External and Internal Plasma- Assisted Combustion, AIAA Paper 2004-1014. Proc. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 4-8 January 2004, Reno, NV, P.10
2. Klimov A., Bityurin V., VanWie D., et al., Plasma Assisted Combustion. AIAA Paper 2002-0493, Proc. 40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 14-17 January 2002, Reno, NV, P.9.
3. Klimov A., Bityurin V., Kuznetsov A., Sukovatkin N., Vystavkin N., Van Wie D.M., 33rd AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference, 11-14 June 2002, Maui, Hawaii, P.10
4. Klimov A., Bityurin V., Brovkin V., Kuznetsov A., Sukovatkin N., Vystavkin N., VanWie D., Optimization of Plasma Assisted Combustion, Proc. 4th Workshop on MPA, Moscow 23-25 April, 2002, IVTAN, P.31
5. Klimov A., Bityurin V., Kuznetsov A., Tolkunov B., Vystavkin N., Sukovatkin N., Serov Yu., Savischenko N., Yuriev A., External and Internal Plasma- Assisted Combustion AIAA Paper 2003-6240. Proc. 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 6-9 January 2003, Reno, NV, P.9.
6. Klimov A., Bityurin V., Kuznetsov A., Vystavkin N., Vasiliev M., External and Combined Discharge Plasma in Supersonic Airflow, Paper 2004-0670. Proc. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 4-8 January 2004, Reno, NV, P.33-38
7. Klimov A., Bityurin V., Study of Plasma-Assisted Combustion of Hydrocarbon Fuel in High-Speed Airflow, Combustion Lows, Ed. Acad. Polezhaev Yu., Moscow, RAS, 2006, P.93-104

9. NON-PREMIXED PLASMA-ASSISTED COMBUSTION IN HIGH-SPEED AIRFLOW

Klimov A., Bitiurin V., Moralev I., Tolkunov B.,* Nikitin A., Velichko A.,
Lebedev Yu., Bilera I.****

**Institute for High Temperature RAS, Moscow*

***Institute of Physics and Chemistry RAS, Moscow*

++Institute of Petrochemical Synthesis RAS, Moscow

Plasma-assisted combustion (PAC) of hydrocarbon fuel in high-speed airflow was studied in our previous works [1-7]. This work is continuation of the previous ones.

New experimental and theoretical results on non-premixed PAC and its completeness in high-speed airflow are considered in this work. Experimental study of internal PAC is carried out in the hot wind tunnel HWT-1. Supersonic airflow ($M < 2$, $P_{st} < 1$ Bar, $T_{st} < 1000$ K) is created in the test section of this experimental set up. Combined electric discharge is used for airflow pre-heating and plasma-assisted combustion. Optical spectroscopy, IR spectroscopy, chemical analysis, high-speed digital camera are used to study plasma and radical generation in PAC zone.

The following main new experimental results were obtained in this work:

1. Dynamics of non-premixed PAC in vortex airflow and non-vortex one is studied by digital high-speed camera. It is revealed that self-organized long-lived PAC structures are created in airflow. Electric power of plasma generators are decreased by these PAC "matches" considerably in our experiment.

2. The final gas composition behind PAC zone is measured by FTIR and chromatograph. Partial pressures and concentrations of chemical species are obtained at different operation modes of plasma generator.

3. Effective H_2 , CO , C_2H_2 , CH_4 , C_6H_6 generation in PAC zone is obtained in rich propane-airflow mixtures.

4. It is revealed that there is high fuel PAC completeness 90-100% in a lean fuel mixture only. This value is decreased up to 40% in rich fuel mixture.

5. Detail optical spectra are recorded in different cross sections of the PAC zone at different operation modes of plasma generator. These spectra are processed and analyzed.

6. Important role of charged and excited carbon clusters (soot particles) on PAC kinetics is studied in this work.

7. Extension of fuel combustion concentration limits for rich and lean mixtures is about 2-4 times at plasma assistance.

8. Combustion temperature limit of lean mixtures is decreased up to 2-3 times at plasma assistance.

References:

1. Klimov A., Bitiurin V., Kuznetsov A., Tolkunov B., Vystavkin N., Vasiliev M., External and Internal Plasma- Assisted Combustion, AIAA Paper 2004-1014. Proc. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 4-8 January 2004, Reno, NV, P.10
2. Klimov A., Bitiurin V., VanWie D., et.al., Plasma Assisted Combustion. AIAA Paper 2002-0493, Proc.40th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 14-17 January 2002, Reno, NV, P.9.
3. Klimov A., Bitiurin V., Kuznetsov A., Sukovatkin N., Vystavkin N., Van Wie D.M., 33rd AIAA Plasma dynamics and Lasers Conference, 11-14 June 2002, Maui, Hawaii, P.10
4. Klimov A., Bitiurin V., Brovkin V., Kuznetsov A., Sukovatkin N., Vystavkin N., VanWie D., Optimization of Plasma Assisted Combustion, Proc.4th Workshop on MPA, Moscow 23-25 April, 2002, IVTAN, P.31
5. Klimov A., Bitiurin V., Kuznetsov A., Tolkunov B., Vystavkin N., Sukovatkin N., Serov Yu., Savischenko N., Yuriev A., External and Internal Plasma- Assisted Combustion AIAA

Paper 2003-6240. Proc. 41st AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 6-9 January 2003, Reno, NV, P.9.

6. Klimov A., Bityurin V., Kuznetsov A., Vystavkin N., Vasiliev M., External and Combined Discharge Plasma in Supersonic Airflow, Paper 2004-0670. Proc. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit, 4-8 January 2004, Reno, NV, P.33-38

7. Klimov A., Bityurin V., Study of Plasma-Assisted Combustion of Hydrocarbon Fuel in High-Speed Airflow, Combustion Lows, Ed. Acad. Polezhaev Yu., Moscow, RAS, 2006, P.93-104

10. ПРОВЕДЕНИЕ ЧИСЛЕННЫХ РАСЧЁТОВ ДЛЯ ВЫЯСНЕНИЯ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПЛАЗМЕННОГО ИНИЦИИРОВАНИЯ ПЛАМЕНИ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОТОКЕ СМЕСЕЙ ВОДОРОДА И ЭТИЛЕНА С ВОЗДУХОМ

И.В. Кочетов*, С.Б. Леонов, А.П. Напартович***

**ГНЦ РФ Троицкий Институт Инновационных и Термоядерных Исследований, Троицк
М.о.*

***Институт Высоких Температур РАН, Москва*

Фундаментальная проблема, стоящая перед разработчиками гиперзвукового прямоточного воздушно-реактивного двигателя (ГПВРД), ускорение воспламенения смеси до сверхзвуковой скорости. В обычных топливно-воздушных смесях волны горения связаны с прогревом газа, поэтому их распространение определяется процессами переноса тепла, которые даже при наличии сильной турбулентности не могут дать необходимой скорости распространения волны. Идея использования плазменных методов воспламенения топлива основана на неравновесной генерации химически активных частиц, ускоряющих процесс горения. Предполагается, что выигрыш в энергии, затрачиваемой для ускорения горения, в плазменных методах достигается за счёт неравновесной природы плазмы в разряде, позволяющей произвести сверхравновесную концентрацию радикалов. Величина эффекта, очевидно, сильно зависит от начальной температуры, давления и состава смеси.

До сих пор нет принципиального доказательства того, что требуемое уменьшение времени индукции возможно для известных топлив и известных видов разрядов, которые могут поддерживаться в сверхзвуковом потоке при атмосферном давлении. Простой нагрев топливно-воздушной смеси до температуры, когда скорость горения попадает в диапазон $10^{-4} - 10^{-5} \text{ с}^{-1}$, также приведёт к необходимому эффекту удержания волны горения в канале. Вопрос минимальной цены, которую можно заплатить за необходимое ускорение горения, имеет принципиальное значение, так как в отсутствие заметного выигрыша применение плазменных методов для этой цели становится нецелесообразным. Представляет большой интерес изучить эффект укорочения времени воспламенения смеси в условиях, которые могут реально осуществляться в сверхзвуковых камерах сгорания.

Впервые была разработана численная модель, сочетающая традиционное приближение химии горения с современной кинетикой плазмы, базирующейся на решении уравнения Больцмана для электронов. Такое приближение позволяет нам самосогласованно описать неравновесный электрический разряд в химически нестабильном (воспламеняемом) газе. Проводится сравнение воспламенения водородно-воздушной и этилен-воздушной смесей в разряде и при тепловом нагреве. Использовались два разных приближения: (1) решение уравнений модели в приближении постоянной плотности и скорости газа; (2) решение уравнений разрядной и химической кинетики в рамках одномерной газовой динамики.

Численное моделирование показало, что использование разряда заметным образом сокращает длину и минимальную энергию, необходимую для воспламенения

предварительно смешанного топлива с воздухом. В частности, для камеры сгорания длиной 80 см, входной статической температуры газа 700К и статического давления газа 1 атм минимальная удельная энергия разряда постоянного тока для стехиометрической водородно-воздушной смеси составляет 150 Дж/г, в то время как при тепловом инициировании потребуется энергия в два раза большая.

Эффект ускорения горения водородно-воздушной смеси в сверхзвуковом канале с помощью разряда постоянного тока не очень чувствителен к отношению топливо/окислитель и постепенно уменьшается при разбавлении горючего.

Показано, что характерные длины воспламенения при инициировании горения тлеющим разрядом в стехиометрической смеси воздуха с этиленом в сверхзвуковом канале, оказываются больше, а требуемые энергозатраты в 1.6 раза выше, чем для водородно-воздушной смеси.

Обнаружено, что приближение постоянной плотности газа по сравнению с точным решением одномерных уравнений газовой динамики незначительно завышает длину воспламенения.

Сравнение эффектов инициирования горения стехиометрической водородно-воздушной смеси непрерывным и импульсным разрядами микросекундной длительностью демонстрирует относительно небольшое различие в величине эффекта. Импульсные разряды микросекундной длительности дают примерно 25% выигрыш в средней мощности, затрачиваемой на поджиг смеси. При сокращении длительности импульса разряда до 10 нс требуемая средняя мощность разряда уменьшается наполовину.

Авторы выражают благодарность Б. В. Потапкину, предоставившему возможность воспользоваться программой Chemical Workbench, и М. И. Стрелковой за помощь в формулировке механизмов горения топливно-воздушных смесей. Работа поддержана академиком Г. Г. Черным в рамках Программы № 20 Президиума РАН.

10. NUMERICAL EVALUATIONS OF PLASMA IGNITION IN SUPERSONIC FLOW OF MIXTURES OF HYDROGEN OR ETHYLENE WITH AIR

I. V. Kochetov, S. B. Leonov¹, A. P. Napartovich

State Research Center of Russia Troitsk Institute for Innovation and Thermonuclear Research (TRINITI), Troitsk, Moscow region

¹*Institute of High Temperature Russian Academy of Science (IVTAN), Moscow*

A fundamental problem faced by designers of a hypersonic ramjet is the acceleration of ignition of a fuel mixture to a supersonic velocity. In common fuel-air mixtures, combustion waves are associated with gas heating; therefore, their propagation is determined by heat transfer processes, which cannot provide a required wave propagation velocity even in the presence of strong turbulence. The idea of using plasma-assisted methods of fuel ignition is based on nonequilibrium generation of chemically active species that speed up the combustion process. It is believed that gain in energy consumed for combustion acceleration by plasmas is due to the nonequilibrium nature of discharge plasma, which allows radicals to be produced in an over-equilibrium concentration. Evidently, the size of the effect is strongly dependent on the initial temperature, pressure, and composition of the mixture.

Up to now there is no clear evidence that the required reduction of the ignition time is feasible for the known fuels and discharge types sustainable in supersonic flow at atmospheric pressure. Thermal heating of a fuel-air mixture can hold the flame provided the burning rate falls into the range $10^{-4} - 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. It is a key problem of the minimum energy cost to be paid for the burning acceleration. If this minimum is not enough low, there is no sense to elaborate plasma methods for ignition problem. To achieve a more reliable evaluation modeling should be done for realistic conditions of the supersonic combustion engine.

For the first time, a numerical model was developed combining traditional approach of thermal combustion chemistry with advanced description of the plasma kinetics based on solution of electron Boltzmann equation. This approach allows us to describe self-consistently strongly non-equilibrium electric discharge in chemically unstable (ignited) gas. The comparison is made between plasma-assisted and thermal ignitions for the hydrogen/air and ethylene/air mixtures. Two different approaches were tested: (1) solving of model equations in approximation of a constant gas density and flow velocity; (2) solving of discharge and chemical kinetic equations in frames of 1-D gas-dynamics.

Numerical simulations demonstrated a notable reduction of the ignition length and the minimum energy input in the discharge required for the ignition of the pre-mixed fuel. In particular, for the hydrogen/air mixture in the combustor duct of length 80 cm, the inlet static gas temperature 700 K and static gas pressure 1 bar the minimum reduced energy input in the direct current glow discharge is 150 J/g, while for the thermal ignition it is as twice as high.

The numerical simulation of dc discharge-initiated combustion of a hydrogen--air mixture in a supersonic channel has shown that the effects of acceleration is not very sensitive to the fuel/oxidant ratio and gradually decreases with fuel dilution.

It is shown that the ethylene/air mixture can be ignited by the glow discharge at the reduced energy input 1.6 times greater than in the case of the hydrogen/air mixture.

It is found that the ignition lengths calculated in the constant-gas-density approximation are only slightly greater than that found in the quasi-1-D gas-dynamic model.

A comparison of the effects of initiation of combustion of the stoichiometric hydrogen--air mixture by a continuous and a pulsed discharge reveals a relatively small difference in the size of the effect. Microsecond pulse discharges give an approximately 25% gain in a time-average energy consumption for ignition of the mixture. At pulse duration about 10 ns, the required average discharge power is halved.

We are grateful to B. V. Potapkin for kindly presenting the possibility of using the Chemical Workbench software and to M.I. Strelkova for assistance in the formulation of combustion mechanisms in air-fuel mixtures. This work was supported by Academician G. G. Chernyi, program no. 20.

11. О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ИМПУЛЬСНОЙ ПЛАЗМЕННОЙ СТРУИ ДЛЯ ВОСПЛАМЕНЕНИЯ ВОЗДУШНО-ПРОПАНОВОЙ СМЕСИ

Александров А. Ф., Ершов А. П., Каменщиков С.А., Колесников Е. Б., Логунов А. А.,
Черников В. А., Шибков В.М.

Физический Факультет МГУ, Москва

Приводятся результаты экспериментальных исследований процесса взаимодействия импульсной плазменной струи со сверхзвуковыми потоками воздуха и воздушно-пропановой смеси. Плазма создавалась плазмодинамическим МПК плазмотроном, продольная ось которого была направлена навстречу потоку под углом 60° к его оси. Определены электрические параметры разряда: падение напряжения на разряде и его ток, мощность и энергия, выделяемая в плазме за время импульса.

По относительным интенсивностям линий меди определялась температура возбуждений соответствующих электронных уровней, которую в условиях настоящих экспериментов в периферийной области струи можно считать близкой к температуре плазмы.

В результате проведенных спектральных измерений было получено поле температур в различных сечениях плазменной струи в сверхзвуковом потоке. Показано, что максимальная температура плазмы в периферийной области струи наблюдается в точках, расположенных у торца МПК – плазмотрона, и при максимальной запасенной энергии достигает величины порядка 4 эВ. Температура плазмы уменьшается при уменьшении

напряжения на накопительном конденсаторе. В общем случае, в различных точках сечения плазменной струи и при различной запасенной энергии температура изменяется в пределах $1,4 \div 4$ эВ.

Эксперименты по исследованию взаимодействия плазменной струи со сверхзвуковым потоком воздушно – пропановой смеси показали, что в результате такого процесса реализуется режим детонационного горения смеси. На основании результатов обработки сигналов с датчиков давления, расположенных по всей длине сверхзвукового канала, были определены типичные условия возникновения в топливной смеси режима детонации и некоторые его характеристики.

11. ON A POSSIBILITY OF PULSED PLASMA JET APPLICATION TO IGNITION OF PROPANE-AIR MIXTURE

A.F. Aleksandrov, A.P. Ershov, S.A. Kamenshikov, E.B. Kolesnikov,

A.A. Logunov, V.A. Chernikov, V.M. Shibkov

Physical department M.V. Lomonosov MSU, Moscow

Experimental investigation results of pulsed plasma jet interaction with supersonic air and propane-air mixture flow are represented. Plasma was created by plasmadynamic magneto-plasma compressor (MPC) plasma generator. Its longitudinal axis was directed towards the flow under the angle of 60° to the plasma. Following discharge electric parameters were determined: voltage drop on the discharge, discharge power, power and energy released in the plasma during the pulse.

Electronic levels excitation temperature was determined by relative intensity of copper lines. It can be considered close to the plasma temperature in the jet periphery in conditions of present experiments.

In results of undertaking spectral measurements we obtained temperature field in different cross sections of the plasma jet in the supersonic flow. We have shown that plasma maximum temperature in jet's periphery was observed in points located near MPC- plasma generator face. At maximum stored energy it reached the value of about 4 eV. Plasma temperature decreased at decrease of the voltage at the storing capacity. Temperature in general case changed in the range $1,4 \div 4$ eV in different points of the plasma jet and at different stored energy.

Experiments on investigations of plasma jet interaction with supersonic flow of propane-air mixture have shown that the mixture detonation combustion mode has been realized in the result of the process. Typical conditions of the detonation mode realization in the fuel mixture and some its parameters have been determined with a help of pressure sensors located along the length of the supersonic channel.

12. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ И ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ПОДЖИГА “АКТИВИРОВАННОГО ПОРИСТОГО ТОПЛИВА”

В.Ю. Великодный В.Ю.¹, А.Ф. Александров², В.Л. Бычков², В.П. Воротилин¹, А.В. Еремеев¹, Л.К. Никитенко¹, И.Б. Тимофеев², В.А. Черников², Ю.Г. Яновский¹, Д. Ван Ви³

¹Институт прикладной механики РАН, Москва

²Московский Государственный университет им. М.В. Ломоносова

³Университет им. Дж. Хопкинса, Лаборатория прикладной физики

На основе теоретических и экспериментальных исследований предложена перспективная схема двухконтурного воздушно-реактивного прямоточного двигателя для

реализации старта гиперзвукового воздушно-космического аппарата прямо с поверхности земли без использования предварительных предускорителей.

Создан "горячий стенд" для исследования и моделирования работы этой схемы и исследования поджига керосина в дозвуковом и сверхзвуковом потоках с использованием "активированного пористого керосина". Разработана форсунка - плазмотрон для подготовки и распыла "активированного пористого топлива", обеспечивающая гарантированный поджиг при наличии барботирования. При отсутствии барботирования поджиг удается получать только при постепенном увеличении расхода керосина через барботер. При отсутствии барботажа с использованием зоны стабилизации пламени и нашего плазмотрона удалось получить стабильное горение в сверхзвуковом потоке при $M < 1.2$ (без подогрева). При наличии барботажа устойчивое горение удавалось получить при больших значениях чисел Маха $M < 1.4$ (без подогрева). Из-за отсутствия полного моделирования, то есть из-за существенного снижения температуры в основном потоке при $1.4 < M < 1.6$, устойчивого горения в наших условиях (при заданных расходах топлива) получить не удалось. При $M > 1.6$ горение в основном сверхзвуковом потоке прекращалось. Необходимо дополнительно модернизировать установку для обеспечения подогрева воздуха. Показана принципиальная возможность стабильного горения керосина в сверхзвуковом потоке даже при низких температурах вплоть до -50°C , при использовании для его поджига "активированного пористого топлива".

Для активации «пористого топлива» используется ударноволновой метод. Для этого газодисперсная смесь топлива и окислителя через форсунку- плазмотрон в нерасчетном режиме подается в основной поток газокапельной смеси топлива и окислителя. При торможении газодисперсной струи образуется ударная волна в виде диска Маха. В этом случае пузырьки с парами топлива и окислителя резко сжимаются, образуются радикалы, продукты конверсии и крекинга. Реализованы режимы эффективного преобразования кинетической энергии в химическую в результате правильного сочетания геометрических размеров устройств, диаметра пузырьков, газосодержания и скорости потока, позволяющее обеспечить изотермический режим ускорения газодисперсной струи и адиабатический режим сжатия во фронте ударной волны.

На основе модели крупномасштабного захвата внешней среды получена замкнутая система дифференциальных уравнений, позволяющая рассчитать параметры пористой струи как функции расстояния от входа и заданных условий ее распространения – скорости и плотности внешней среды, силы тяжести (для плавучих струй), а также начального угла наклона струи по отношению к направлению скорости внешнего потока газа. Результаты расчета качественно и количественно описывают классические эксперименты, подтверждая тем самым справедливость принятых допущений. Расчеты подтвердили то весьма важное свойство пористой струи, что с увеличением начального газосодержания сокращается длина ее участка, на котором устанавливается стехиометрический состав смеси.

12. EXPERIMENTAL AND THEORETICAL INVESTIGATION OF "ACTIVATED POROUS FUEL" IGNITION PROCESSES

V.Yu. Velikodnyi¹, A.F. Aleksandrov², V.L. Bychkov², V.P. Vorotilin¹, A.V. Ereemeev¹, L.KK. Nikitenko¹, I.B. Timofeev², V.A. Chernikov², Yu.G. Yanovskii¹, D. VanWie³

¹Institute of applied mechanics RAS, Moscow

²M.V. Lomonosov Moscow state university

³The Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory

Prospective scheme of two-line air jet direct flow engine for realization of hypersonic air-cosmic vehicle start directly from the earth surface without application of preliminary

preaccelerator has been proposed on a basis of theoretical and experimental investigations.

"Hot stand" for investigations and modeling of this scheme operation has been created. It is also aimed to studies of kerosene ignition in subsonic and supersonic flows applying. Sprayer-plasmagenerator for preparation and atomization of "activated porous fuel" Has been developed. It ensures fuel ignition at bubbling. Without bubbling one can realize a fuel ignition only at gradual kerosene consumption increase through the bubblier. In the case without bubbling we managed to realize a stable combustion in supersonic flow at $M < 1.2$ (without heating) at application of flame stabilization zone and our plasmagenerator. At bubbling we manage to realize the stable bubbling at large values of Mach number, $M < 1.4$ (without heating). We did not realize the stable combustion in our conditions (at given fuel mass flow rate) at $1.4 < M < 1.6$ due to essential temperature decrease in the main flow. The combustion stopped in main supersonic flow at $M > 1.6$. It is necessary to additionally modernize our set up in order to ensure air heating.

We have demonstrated a principle possibility of kerosene stable combustion in the supersonic flow even at low temperature down to -50°C at application of "activated porous fuel" for its ignition.

Shock wave method is used for "porous fuel" activation. For this purpose the gas-disperse mixture of the fuel and oxidizer is delivered to the main flow of gas-drop mixture of the fuel and oxidizer through the sprayer-plasmagenerator in abnormal mode. The shock wave in a form of Mach disc is formed at gas-disperse stream stagnation. Bubbles with vapors of the fuel and oxidizer are sharply compressed in this case, radicals, cracking and conversion products are created at that.

Modes of effective conversion of kinetic energy to the chemical one have been realized thanks to correct combining of device's geometrical sizes, bubble diameters, gas content and flow velocity. This allowed to ensure isothermal mode of gas-disperse stream acceleration and adiabatic mode of compression in the shock wave front.

Closed system of differential equations has been obtained on an basis of large scale capture of external medium model. It allows to calculate the porous stream parameters as the function of the distance from the inlet and given conditions of its propagation: external medium velocity and density, gravitation force (for floating streams), and initial incline angle of the stream with respect to the direction of external gas flow velocity.

Calculation results qualitatively and quantitatively describe classical experiments confirming correctness of accepted assumptions. Calculations have confirmed a very important porous stream feature that its part length decreases at which the stoichiometric mixture composition establishes with increase of the initial gas content.

13. ПЛАЗМЕННАЯ ДЕТОНАЦИЯ ПРИ СВЕРХЗВУКОВОМ ДВИЖЕНИИ В ГАЗОПЛАЗМЕННЫХ СРЕДАХ

Ю.Л. Серов.

ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН, Санкт-Петербург

За последние годы в области динамики плазмы получены данные, изменяющие наши представления о динамических свойствах столкновительной слабоионизованной плазмы. Полученные результаты связаны с существованием фундаментальных резонансных нелинейных динамических свойств неравновесной плазмы. В результате проведения комплекса баллистических исследований был исследован новый ионно-акустический механизм, сопровождающий взаимодействие ударных волн с возбуждённым и ионизованным газом. Это позволило объяснить ряд непонятных до настоящего времени эффектов, в том числе аномальное обтекания высокоскоростных тел неравновесной слабоионизованной плазмой газового разряда, а также физическую природу

ионизационной неустойчивости ударных волн. Однако, проблема взаимодействия высокоскоростных течений с плазмой не исчерпывается только этими фундаментальными и прикладными аспектами. Нелинейные динамические свойства неравновесной плазмы являются проявлением фундаментальных законов природы и реализуются также при движении сверхзвуковых тел и ударных волн в химически реагирующих газах, когда в ходе реакции образуются возбуждённые и ионизованные частицы. Особый интерес представляют исследования законов, по которым происходит высокоскоростное горение и детонация. Считается, что детонация представляет собой совокупное воздействие ударной волны и химической реакции, поддерживающей интенсивность ударного взаимодействия. При этом наблюдается электромагнитное взаимодействие, вызванное до сих пор не исследованными неравновесными процессами. Некоторые авторы отмечают значительное сходство детонации с ионизационной неустойчивостью ударных волн не только в самых общих чертах, но даже в детальных признаках. Это может свидетельствовать об общем электродинамическом физическом механизме, реализующемся при высокоскоростном движении в плазме. Плазма может создаваться искусственно с помощью газового разряда или образовываться самой ударной волной при фотоионизации или в ходе химических реакций. Вследствие этого представляет значительный интерес рассмотреть проблему детонации и распространения ударных волн в горючих смесях с точки зрения обнаруженных новых физических принципов, лежащих в основе взаимодействия высокоскоростных потоков с неравновесной плазмой. В докладе исследована роль нелинейных динамических свойств неравновесной плазмы в реализации процессов сверхзвукового горения и детонации. В рамках ионно-звуковой модели рассмотрена кинетическая схема формирования ионно-звукового солитонного сгустка в многожидкостной модели кислородно-водородной плазмы вблизи фронта ударной волны. Установлено, что в смеси газов особая роль принадлежит кислороду, поскольку он имеет низко расположенные энергетические термы, которые легко могут заселяться при столкновениях и участвовать в плазмообразовании. Установлено, что значения предельных скоростей детонации для различных смесей совпадают с максимальной фазовой скоростью солитонных сгустков. Например, оценки по ионно-звуковой модели показали, что общие пределы детонации (1,7-2,8 км/сек) смеси $2\text{H}_2 + \text{nO}_2$ при нормальном давлении связаны с диапазоном существования солитонного сгустка, образованного ионами кислорода. Параметры этого сгустка обусловлены ударами второго рода с участием нижнего метастабильного уровня молекулы кислорода с энергией $E = 0,98$ эВ. Проведённые исследования показывают, что высокоскоростное горение определяется законами резонансной нелинейной плазмодинамики и наиболее эффективно реализуется в области высокоионизованного солитонного сгустка.

Литература:

1. Ю.Л.Серов, И.П.Явор. Волны заряда в ионизованном газе перед гиперзвуковым телом. ЖТФ т.66, в.11, 1996, стр.181-186.
 2. Yu.L.Serov. Experimental Investigation of a Supersonic Sphere Motion in Plasma on Ballistic Apparatus. Proc. 2nd Weakly Ionized Gases Workshop, Norfolk, 1998, pp.32-45.
 3. V.A.Pavlov, Yu.L.Serov. Supersonic Motion of a Body in Weakly Ionized Plasma: Phenomena of Trans-Ion- Acoustic Plasma Dynamics. 3rd Weakly Ionized Gases Workshop, Norfolk, 1999, AIAA-99-4852.
 4. В.А.Павлов. Ионно-звуковой эффект лошади Хьюстона. Физика плазмы, 2000, т.26, №6, с.543-547.
-

13. PLASMA DETONATION AT SUPERSONIC MOVEMENT IN GAS-PLASMA MEDIUMS

Yu.L. Serov

Ioffe Institute RAS, St.-Petersburg

For last years in the field of plasma dynamics the data changing our representations about dynamic properties of collisional weakly ionized plasma are received. The received results are connected to existence of fundamental resonant nonlinear dynamic properties of nonequilibrium plasma. As a result of carrying out of a complex of ballistic researches the new ionic - acoustic mechanism accompanying interaction of shock waves with excited and ionized gas has been investigated. It has allowed to explain a number of not clear till now effects, including abnormal flows of high-speed bodies by nonequilibrium weakly ionized plasma of the gas discharge, and also the physical nature of ionization instability of shock waves. However, the problem of interaction of high-speed flows with plasma is not settled only by these fundamental and applied aspects. Nonlinear dynamic properties of nonequilibrium plasma are display of fundamental laws of the nature and are realized also at movement of supersonic bodies and shock waves in chemically reacting gases when during reaction the excited and ionized particles are formed. Special interest is represented the laws on which there is a high-speed burning and detonation. It is considered, that the detonation represents cumulative influence of a shock wave and the chemical reaction supporting intensity of shock interaction. Thus the electromagnetic interaction caused till now by not investigated nonequilibrium processes is observed. Some authors mark significant similarity of a detonation with ionization instability of shock waves not only in the most general features, but even in detailed attributes. It can testify to the general electrodynamic physical mechanism realized at high-speed movement in plasma. Plasma can be created artificially by the gas discharge or to be formed by the shock wave at photo ionization or during chemical reactions.

Thereof it represents the significant interest the consideration of detonation and propagation of shock waves in gas mixtures from the point of view of detected new physical principles of interaction of high-speed flows with nonequilibrium plasma. In the report the role of nonlinear dynamic properties of nonequilibrium plasma in realization of processes of supersonic burning and a detonation is investigated. Within the framework of ion - acoustic model the kinetic scheme of ion - acoustic soliton bunch formation in multifluid model of oxygen - hydrogen plasma near to front of a shock wave is considered. In a mix of gases the special role belongs to oxygen as it has low located power terms which can easily be occupied at collisions and participate in plasma formation is established. The values of speed limits of a detonation for various mixes coincide with the maximal phase speed of a soliton bunches is shown. For example the estimations on ion - acoustic model have shown, that the common limits of a detonation (1,7-2,8 km/s) of a mix $2\text{H}_2 + \text{nO}_2$ at normal pressure are connected to a range of existence of a soliton bunch, which is formed by the oxygen ions. Parameters of this bunch are caused by impacts of the second kind with participation of the lower metastable level of an oxygen molecule with energy $E = 0,98 \text{ eV}$. The carried out researches show, that high-speed burning is determined by the laws of resonant nonlinear plasma dynamics and this most effectively realized in area of high ionized soliton bunch.

References:

1. Yu.L.Serov, I.P.Yavor. Waves of charge in ionized gas before hypersonic body. Tech. Phys. v.66 (11), pp.181-186 (1996), in Russian.
2. Yu. L.Serov. Experimental Investigation of a Supersonic Sphere Motion in Plasma on Ballistic Apparatus. Proc. 2nd Weakly Ionized Gases Workshop, Norfolk, 1998, pp.32-45.
3. V.A.Pavlov, Yu. L.Serov. Supersonic Motion of a Body in Weakly Ionized Plasma:

Phenomena of Trans-Ion-Acoustic Plasma Dynamics. 3rd Weakly Ionized Gases Workshop, Norfolk, 1999, AIAA-99-4852.

4. V.A.Pavlov. Ion-Acoustic "Houston's Horse Effect". Plasma Physics Reports, 2000, v.26, №.6, pp.507-511.

14. ГАЗОРАЗРЯДНАЯ ПЛАЗМА ВОЗДУХА В СВЕРХЗВУКОВОМ МГД КАНАЛЕ

С.В. Бобашев, Р.В. Васильева, А.В. Ерофеев, Б.Г. Жуков,

Т.А. Лапушкина, С.А. Поняев

Физико-технический институт им. А.Ф.Иоффе РАН, Санкт-Петербург

Целью настоящего исследования является создание однородного объема воздушной или азотной газоразрядной плазмы, движущегося в сверхзвуковом МГД канале при числах Маха потока $M = 3-5$ и параметре МГД взаимодействия St , достаточном для наблюдения МГД эффектов ($St = 0,05$).

Данная работа представляет собой продолжение цикла работ по экспериментальному исследованию возможности управления скачками в диффузоре с помощью МГД метода. До сих пор эта задача в основном моделировалась путем использования в качестве рабочего вещества ионизованного инертного газа Хе [1]. Попытки ионизовать воздух с помощью газового разряда были предприняты авторами в [2]. Некоторые теоретические результаты по исследованию неравновесной воздушной плазмы приведены в [3].

На первом этапе данной работы были испробованы различные способы организации газового разряда для создания диффузной плазмы в неподвижном объеме газа. Наиболее перспективным ионизатором воздуха и азота оказался комбинированный разряд, осуществленный с помощью изолированных, подключенных на различные балластные сопротивления штырей. Комбинированный разряд состоит из ВЧ разряда с частотой 10 МГц длительностью около 2 мкс. и высоковольтного импульсного разряда длительностью примерно 5 мкс. Как показал эксперимент наиболее однородным разряд получается при давлении около 15 торр.

На основе этих данных был разработан МГД канал с импульсно- периодической ионизацией газа. Поток воздуха или азота создается в ударной трубе с отражающим соплом. МГД канал представляет собой линейно расширяющийся канал с углом раствора 22 град, длиной 440 мм и поперечным размером 40мм. В середине зоны взаимодействия число Маха потока $M = 4$, скорость потока $u = 1,4 \cdot 10^3$ м/с, температура газа $T=350$ К, давление $p=15$ тор. Индукция магнитного поля 1,5Т. На электроды ионизаторов с интервалом порядка 10мкс в определенном порядке подаются короткие ионизирующие импульсы.

В докладе будут представлены результаты экспериментов по работе сверхзвукового МГД канала, работающего на импульсно-периодической ионизации воздуха (азота).

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ 05-01-00446а и программы президиума РАН «Взаимодействие высокоскоростных потоков газа с плазмой».

Литература:

1. S.V.Bobashev, A.V.Erofeev, T.A.Lapushkina, S.A.Poniaev, R.V.Vasil'eva, D.M. Van Wie "Experiments on MHD control of Attached Shocks in Diffuser", AIAA Paper 2003-0169
2. S.V. Bobashev, A.V. Erofeev, T.A. Lapushkina, S.A. Poniaev, R.V. Vasil'eva, D.M. Van Wie. "Characteristics of the MHD Diffuser Under Different Commutations of Current" AIAA Paper 2005-1334
3. E. Sheikin and A. Kuranov, MHD Generator with Nonequilibrium Conductivity for Flow Control, AIAA Paper 2006-1372, 2006

14. GAS DISCHARGE AIR PLASMA IN SUPERSONIC MHD CHANNEL

S.V.Bobashev, A.V.Erofeev, T.A.Lapushkina, S.A.Poniaev, R.V.Vasil'eva, B.G.Zhukov
Ioffe Physico-Technical Institute Russian Academy of Sciences, St.Petersburg

The aim of this project is to produce a uniform volume of air (nitrogen) gas-discharge plasma moving in a supersonic MHD channel at Mach numbers $M = 3-5$ with conductivity sufficient for MHD interaction ($St=0,05$).

This project is a continuation of the series of earlier experimental studies on possibility to control attached shocks in a diffuser by the MHD method. Until now this task has been modeled by using ionized rare gas as a working medium [1]. Attempts to ionize air by the gas discharge were reported in [2]. Some theoretical results on investigation of nonequilibrium air plasma are presented in [3].

Until now the different methods of production of gas discharge for creation of diffuse plasma in non-moving gas were tested. The results show that the most efficient ionizer for air and nitrogen is a combined discharge produced through isolated pin electrodes with different ballast resistances. The combined discharge consists of a HF discharge with a frequency of 10 MHz of 2 mks duration and a high-voltage pulse discharge with a duration of 5 mks. As was shown experimentally the most uniform discharge is made at pressure of about 15 torr.

On the basis of this data the MHD channel with pulse-periodic gas ionization was made. A flow of air or nitrogen is produced in a shock tube with a reflecting nozzle. The MHD channel is a 440-mm long linearly divergent channel with an opening angle of 22 degrees. Its transverse size is 35 mm. At the middle of the interaction zone the Mach number of the flow is $M=4$, the flow velocity is $u = 1.4 \cdot 10^3$ m/s, gas temperature is $T=350$ K, and pressure is $p=15$ torr. The maximum value of magnetic field induction is 1.5 T. Short ionizing pulses are applied to ionizer electrodes with an interval of 10 mks in a definite sequence.

In the report, results obtained in the experiments with the supersonic MHD channel operating on the basis of pulse-periodic air (nitrogen) ionization will be presented.

The work was supported by RFBR 05-01-00446a and Program of RAS Presidium "Interaction of high-speed gas flow with plasma".

References:

1. S.V.Bobashev, A.V.Erofeev, T.A.Lapushkina, S.A.Poniaev, R.V.Vasil'eva, D.M. Van Wie "Experiments on MHD control of Attached Shocks in Diffuser", AIAA Paper 2003-0169
2. S.V. Bobashev, A.V. Erofeev, T.A. Lapushkina, S.A. Poniaev, R.V. Vasil'eva, D.M. Van Wie. "Characteristics of the MHD Diffuser Under Different Commutations of Current" AIAA Paper 2005-1334
3. E. Sheikin and A. Kuranov, MHD Generator with Nonequilibrium Conductivity for Flow Control, AIAA Paper 2006-1372, 2006

15. РАСЧЕТ ПРОВОДИМОСТИ ПОТОКА СОЗДАВАЕМОЙ ЭЛЕКТРОННЫМ ПУЧКОМ ДЛЯ МГД УПРАВЛЕНИЯ ПОТОКОМ

Е.Г. Шейкин

*Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем, Санкт-Петербург
 Санкт-Петербургский государственный университет*

Исследуется процесс формирования проводимости воздушного потока с помощью электронного пучка в приложении к проблеме МГД управления течением. Обсуждаются влияние электрического и магнитного полей на концентрацию электронов и на проводимость потока в неравновесной плазме. Исследуется влияние неоднородностей

потока на пространственное распределение мощности выделяемой электронным пучком при прохождении через воздушный поток. Предложен метод расчета концентрации электронов и проводимости плазмы пространственно неоднородного воздушного потока создаваемые электронным пучком в условиях характерных для МГД управления потоком.

15. CALCULATION OF CONDUCTIVITY SUSTAINED BY ELECTRON BEAM IN MHD FLOW CONTROL APPLICATIONS

E.G. Sheikin

*Hypersonic Systems Research Institute, St. Petersburg
Saint-Petersburg State University, St. Petersburg*

The process of formation of the air flow conductivity by using electron beam is investigated in connection with the MHD flow control applications. The electric and magnetic fields influence on the electron concentration and on the flow conductivity is discussed. Influence of the flow nonuniformities on the spatial distribution of the energy deposited by e-beam in the air flow is investigated. The method of calculation of electron concentration and conductivity of plasma sustained by e-beam in a nonuniform air flow in conditions typical for MHD flow control applications is developed.

16. МГД УПРАВЛЕНИЕ ПОТОКОМ

В.А.Битюрин, А.Н.Бочаров, Д.С.Баранов

Институт высоких температур Российской Академии Наук (ИВТРАН), Москва

А.В.Красильников, Ю.А.Пластинин

*Центральный научно-исследовательский институт машиностроения (ЦНИИМАШ)
Королев, Московская область*

Проведены фундаментальные исследования в области магнито-плазменной аэродинамики по МГД управлению внешними и внутренними течениями. Экспериментально и теоретически исследовалось МГД обтекание простейших тел, таких как круглый цилиндр и клин. Основной задачей являлась оценка снижения тепловых потоков с помощью МГД-взаимодействия и оценка потенциальных возможностей МГД метода модифицировать поле течения на входе воздухозаборника гиперзвукового летательного аппарата.

МГД управление внутренними течениями рассматривалось как эффективное средство с точки зрения интенсификации процессов смешения и горения в высокоскоростных газо-плазменных потоках. В работе формулируется и проверяется с помощью численных экспериментов новая концепция реакционного объема.

Экспериментальные исследования проводились на двух установках с параметрами, близкими к натурным: гиперзвуковой аэродинамической трубе ЦАГИ с МГД ускорением потока (гиперзвуковые испытания) и дозвуковом высокочастотном плазматроне ЦНИИМАШ продолжительной непрерывной работы (до и трансзвуковые испытания). Обе установки характеризуются мегаваттным уровнем энергии потока. Эти эксперименты сопровождалось большим объемом численных расчетов с использованием программного блока Plasmaero.

16. MHD FLOW CONTROL

V.A. Bityurin, A.N. Bocharov, D.S. Baranov

Institute of High Temperatures of Russian Academy of Sciences (IVTAN), Moscow

A.V. Krasilnikov, Yu.A. Plastinin

Central Research Institute of Machine Building (TsNIIMash), Korolev, Moscow region

The fundamental study in the field of magneto plasma aerodynamics, and in particular, MHD control of external and internal flows is presented. The MHD control of the external hypersonic flow over the simplest bodies such as circular cylinder and wedge is analyzed experimentally and numerically to estimate the peak heat flux reduction due to MHD interaction in up-stream area.

The MHD control of internal flows is considered as an effective way to intensify the processes of the convective-diffusive mixing in high-speed gas-plasma flows. The new concept of the reacting volume formation formulated and validated with numerical simulations for such processes earlier is to be studied experimentally.

The experiments conducted at two sub-full scale facilities: hypervelocity MHD driven WT of blow-down operation at TsAGI (hypersonic flow tests) and subsonic high frequency plasmatron driven WT of continuous operation at TsNIIMash (sub- and transonic flow tests). Both facilities are of MW level of flow power. These experiments are supported by wide range numerical simulations with PlasmaAero family computer code.

17. INTERACTION OF PULSED ENERGY DEPOSITION WITH A NORMAL SHOCK: EXPERIMENTAL AND COMPUTATIONAL INVESTIGATION

Doyle Knight

Rutgers: The State University of New Jersey, Piscataway, NJ

Hong Yan

Dept of Mechanical and Materials Engineering, Wright State University, Dayton, OH

Taylor Swanson, Greg Elliott, and Nick Glumac

University of Illinois at Urbana-Champaign, Urbana, IL

A joint experimental and computational study was performed to investigate the flow field resulting from the interaction of pulsed energy deposition with a normal shock wave created in a supersonic flow with a nominal Mach number of 1.5. The energy is deposited in the flow by focusing a laser beam from a pulsed Nd: YAG laser. The laser energy absorbed by the deposition process was 170 mJ resulting in a nondimensional deposition energy as defined by Yan et al. [1] on the order of 630. The experiments were conducted at the University of Illinois in a newly constructed supersonic tunnel with a measured Mach number of 1.4. The location of the unperturbed normal shock is held relatively constant utilizing a second throat and regulating the incoming stagnation pressure. Laser positions were investigated with the laser spark focused in the middle of the normal shock at a streamwise location 25 mm before (Case 1) and approximately at (Case 2) the normal shock location. Both instantaneous and phase averaged digital schlieren photography images were taken at delay times ranging from 5 to 220 us relative the initiating laser spark. The heated region and blast wave are clearly visible, as well as, the resulting effect on the normal shock train. For Cases 1 and 2 the thermal region created by the energy deposition process induced a thermal lensing effect on the normal shock as it is locally pulled forward by the increased speed of sound resulting from the higher temperature which locally decreases the Mach number. After the heated region passes through the normal shock, the center of the shock moves slightly upstream resulting in a flattened appearance. As the heated region

passes through the shock it appears to form into a ring vortex structure with the axis oriented in the streamwise direction becoming elongated as it convects downstream. The energy deposition and normal shock interaction was also studied using a two-dimensional numerical simulation utilizing GASPex to solve the compressible Navier-Stokes equations and a perfect gas model of the energy deposition process, which has been described previously. [2] Figure 1 shows an image of the computed Mach number and total pressure contours, and experimental Schlieren image for a single laser energy pulse (Case 2) upstream of Mach 1.5 normal shock wave-turbulent boundary layer interaction. Quite clear is the thermal lensing effect on the normal shock wave and the initiation of the vortex structure, which is observed in both the computations and experiments.

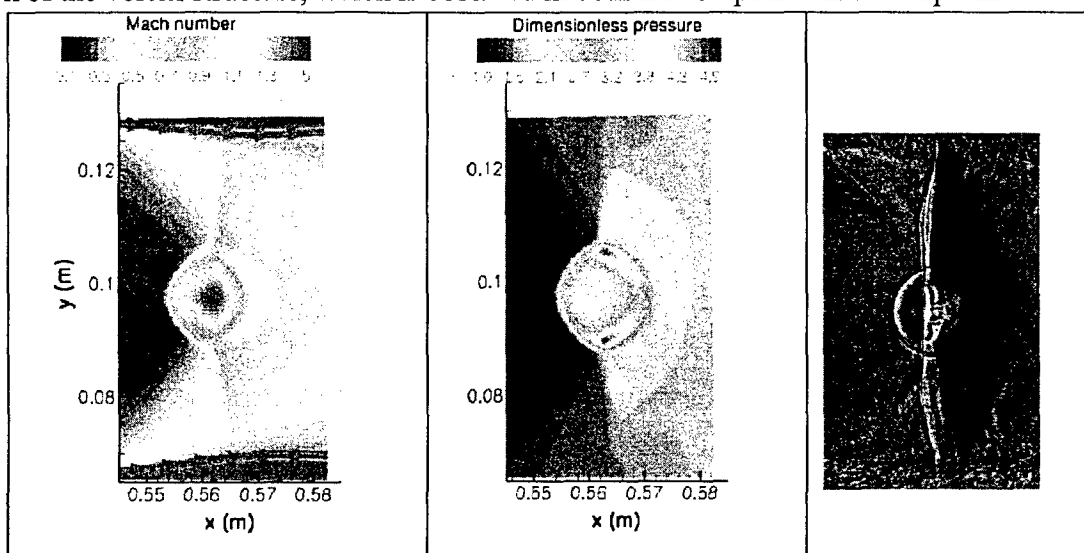


Figure 1. Computed Mach number (a) and pressure (b) contours and an experimentally obtained schlieren image of the interaction of laser energy deposition with a normal shock in a nominal Mach 1.5 flow.

References:

1. Yan, H., Knight, D., and Elliott, G., "Numerical Study of Control of Normal Shock by Energy Pulse," AIAA Paper 2005-785, 2005.
2. Yan, H., Adelgren, R., Boguszko, M., Elliott, G.S., and Knight, D." Laser Energy Deposition in Quiescent Air," AIAA Journal, Vol. 41, No. 10, pp. 1988-1995, 2003.

18. A KINETIC MODEL OF MICROWAVE ENERGY DEPOSITION IN AIR

Yuri Kolesnichenko

Dept of MHD and Low Temperature Plasma, IVTAN, RAS, Moscow

Dmitri Khmara

Dept of MHD and Low Temperature Plasma, IVTAN, RAS, Moscow

Doyle Knight

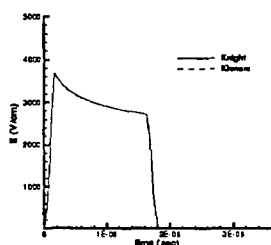
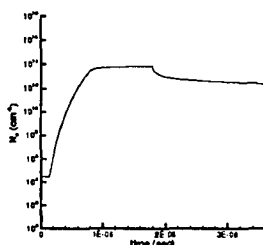
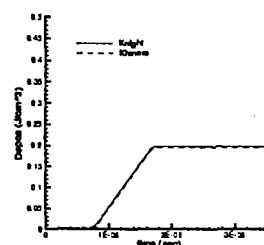
Dept of Mechanical and Aerospace Engineering, Rutgers University, New Brunswick, NJ USA

Recent research on microwave energy deposition in air has emphasized its potential for aerodynamic flow control. In particular, microwave plasmoids have been demonstrated experimentally to achieve drag reduction of extraordinary efficiency in supersonic flow past blunt bodies.[1,2] Perfect gas simulations [3] of the interaction of a thin elongated "density well" (*i.e.*, the thin filament formed within the microwave plasmoid) with a blunt body in supersonic flow have confirmed the principal effect to be thermal. However, a more detailed real gas

model is needed for two reasons. First, the timescales for the relaxation of the gas species following the microwave pulse range from the order of the pulse duration ($\approx 1 \mu\text{s}$) to the flow convection time ($\approx 10 \mu\text{s}$). Second, the microwave filament locations are somewhat random. Since the drag reduction is strongly dependent on the orientation of the filament with respect to the blunt body shock (*i.e.*, a filament elongated in the direction of the flow and aligned with the axis of the body yields the largest drag reduction), it is important to develop more detailed models of microwave energy deposition.

A kinetic model of microwave energy deposition in air has been developed.[4] The model includes 23 species and 234 reactions. The reaction coefficients of electron-neutral reactions (excitation, ionization, dissociation, attachment *etc*) were computed based upon numerical solutions of the Boltzmann equation for electron energy in an external field using the code and database EEDF developed at the Institute for High Temperatures RAS. A correction factor is applied to field dependent reactions. The gas temperature T_g is determined by elastic collisions of the electrons, the heat of reactions and rotational heating through microwave energy deposition.

Results for the simulation of microwave energy deposition in air at 70 Torr and initial T_g of 200 K are shown in Figs. 1 to 3. The microwave frequency is 9 GHz, and the specified pulse duration is $1.8 \mu\text{s}$ with a maximum field 3.687 kV/cm (Fig. 1). The electron concentration and energy deposition are shown in Figs. 2 and 3. The computed gas temperature T_g at $t = 3.6 \mu\text{s}$ is 280 K which agrees closely with the experimental $T_g = 270 \text{ K}$ at the end of the pulse.

Figure 1. E vs t Figure 2. N_e vs t Figure 3. ϵ vs t

This research is supported by the Air Force Office of Scientific Research under Grant FA9550-04-1-0177 and by the European Office of Aerospace Research and Development under Grant ISTC 047003. Both grants are managed by Dr. John Schmisser.

References:

1. Brovkin, V., Kolesnichenko, Y., and Leonov, S. *et al*, "Study of Microwave Plasma-Body Interaction in Supersonic Flow," *AIAA Paper No. 99-3740*, 1999.
2. Kolesnichenko, Y., Brovkin, V., Azarova, O., Grudnitsky, V., Lashkov, V., and Mashek, I., "Microwave Energy Deposition for Aerodynamic Application," *AIAA Paper No. 2003-0361*, 2003.
3. Kolesnichenko, Y., Brovkin, V., Azarova, O., Grudnitsky, V., Lashkov, V., and Mashek, I., "Energy Release Regimes for Drag Reduction in Supersonic Flow," *AIAA Paper No. 2002-0353*, 2002.
4. Khmara, D., Kolesnichenko, Y., and Knight, D., "Modeling of Microwave Filament Origination," *AIAA Paper 2006-0794*, 2006.

19. ИНИЦИАЦИЯ И ПОДДЕРЖАНИЕ СЛАБОЙ ДЕТОНАЦИОННОЙ ВОЛНЫ В ПОТОКЕ СО СКОРОСТЬЮ ВЫШЕ СКОРОСТИ ЧЕПМЕНА-ЖУГЕ С ПОМОЩЬЮ МИКРОВОЛНОВОГО РАЗРЯДА

Кирилл В. Ходатаев

ФГУП "Московский Радиотехнический Институт РАН"

Способность микроволнового подкритического разряда высокого давления инициировать и поддерживать горение в горючих газовых смесях в высоко-скоростных потоках (вплоть до сверхзвуковых) показано теоретически и экспериментально. [1-4] Теоретическое исследование предсказывает, что микроволновые разряды этого типа способны инициировать не только горение, но также и детонацию. Волокнистая структура разряда создает горячие активные центры подобно активным точкам в ячейках фронта детонационной волны в режиме Чепмена - Жуге. Это означает, что искусственные активные точки, создаваемые микроволновым разрядом в определенной области потока горючей смеси, могут формировать квазистационарную слабую (недосжатую) волну детонации в заданном месте. Стимулируемая слабая волна детонации может существовать в широком диапазоне скорости набегающего потока, если она превышает скорость Чепмена-Жуге.

Применение детонационного режима горения в реактивных двигательных системах обсуждается в течение более половины столетия. Наиболее привлекательной является идея использования стационарной волны детонации. Отмеченные способности микроволнового подкритического разряда помогут решать некоторые проблемы, касающиеся разработки реактивных двигателей, основанных на детонационном горении в стационарном режиме.

Литература:

1. Igor Esakov, Lev Grachev, Kirill Khodataev and David Van Wie. *Experiments on propane ignition in a high-speed airflow with a help of deeply undercritical microwave discharge*. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting 5-8 January 2004, Reno, NV. Paper AIAA-2004-0840.
2. I. Esakov, L. Grachev and K. Khodataev, D. Van Wie. *Efficiency of Energy Put into Initiated Microwave Discharge in High-Speed Air Flow and Propane Level of Combustion in It*. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting 10-13 January 2005, Reno, NV. Paper AIAA-2005-0989
3. K. Khodataev. *Numerical Modeling of the Combustion, Assisted by the Microwave Undercritical Attached Discharge in Supersonic Flow*. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting 10-13 January 2005, Reno, NV. Paper AIAA-2005-0985
4. K. Khodataev. *The Ignition of the Combustion and Detonation by the Undercritical Microwave Discharge*. AIAA Plasmadynamics and Laser Conference, 32nd, and Weakly Ionized Gases Workshop, 4th, Anaheim, CA. Jun 11-14, 2001. AIAA Paper 2001-2941.

19. WEAK DETONATION WAVE IGNITION AND SUSTAINING IN OVER CJ-SPEED FLOW BY MEANS OF UNDERCRITICAL MICROWAVE DISCHARGE

Kirill V. Khodataev

UFSF "Moscow Radiotechnical Institute of RAS"

The microwave undercritical high pressure discharges ability to ignite and to sustain combustion in flammable gas mixes in high-speedy flows (up to supersonic flows) is shown theoretically and experimentally. The performed theoretical study predicts that microwave discharges of the same type are able to ignite not only combustion, but detonation too. The

filamentary structure of discharge creates the hot active centers like active points in cells in front of CJ detonation wave. It means that artificial active points, created by microwave radiation in definite region of combustible mix flow, will be able to provoke the quasi-stationary weak detonation wave in fixed location. The stimulated weak detonation wave can exist at wide diapason of oncoming flow speed, if it is more CJ velocity.

Application of detonation regime of burning in propulsive systems is discussed during more than half century. The most attractive idea is based on use of standing detonation wave in jet engines. Noted property of microwave undercritical discharge will help to solve some problems concerning to design of propulsive jet engines based on detonation in continuous mode.

References:

1. Igor Esakov, Lev Grachev, Kirill Khodataev and David Van Wie. *Experiments on propane ignition in a high-speed airflow with a help of deeply undercritical microwave discharge*. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting 5-8 January 2004, Reno, NV. Paper AIAA-2004-0840.
2. I. Esakov, L. Grachev and K. Khodataev, D. Van Wie. *Efficiency of Energy Put into Initiated Microwave Discharge in High-Speed Air Flow and Propane Level of Combustion in It*. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting 10-13 January 2005, Reno, NV. Paper AIAA-2005-0989
3. K. Khodataev. *Numerical Modeling of the Combustion, Assisted by the Microwave Undercritical Attached Discharge in Supersonic Flow*. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting 10-13 January 2005, Reno, NV. Paper AIAA-2005-0985
4. K. Khodataev. *The Ignition of the Combustion and Detonation by the Undercritical Microwave Discharge*. AIAA Plasmadynamics and Laser Conference, 32nd, and Weakly Ionized Gases Workshop, 4th, Anaheim, CA. Jun 11-14, 2001. AIAA Paper 2001-2941.

20. CONTROL OF FLOW PAST A WING SECTION WITH PLASMA-BASED BODY FORCES

Datta Gaitonde, Miguel Visbal, and Subrata Roy

The response of the flow past a stalled NACA 0015 airfoil at 15 deg angle of attack and Reynolds number of 45, 000 to body forces originating from radio-frequency asymmetric dielectric-barrier-discharge actuators is described via direct numerical simulations. The theoretical model couples a phenomenologically derived averaged body force with a high-order 3-D compressible Navier-Stokes solver. The body force distribution is assumed to vary linearly, diminishing away from the surface until the critical electric field limit is reached. Various magnitudes and orientations of the force field are explored, ranging from vertically upwards (away from the body) to vertically downwards (towards the body). The imposed body forces couple to the non-linear inertial terms and the pressure gradients to engender a complex sequence of events. A significant streamwise component of body force assures the reduction or elimination of stall with the formation of a stable wall-jet.

When the only component of the force vector is pointed normal to and away from the surface, no control effect is achieved. On the other hand, when the force vector is directed towards the surface, a shallower separation region is observed relative to the no-control case, but is accompanied by unsteady boundary layer development. At the low Mach number considered (0.1), the work done by the force has little impact on the solution, and density variations remain less than 5%. Relaxation effects are explored by abruptly switching off the force, and

estimates of response times are noted. The lack of a proper spanwise breakdown mechanism for the separated shear layer in 2-D simulations results in large coherent structures,

whose response in transient and unsteady asymptotic states differ significantly from those observed in 3-D. Nonetheless, if the force is sufficiently effective to eliminate separation, the flowfield becomes generally two-dimensional and steady in the vicinity of the airfoil, and the overall results from 2-D and 3-D analyses are similar.

21. СОВМЕСТНОЕ ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ВДУВА ГАЗА И СВЧ РАЗРЯДА ДЛЯ УМЕНЬШЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ В СВЕРХЗВУКОВОМ ПОЛЁТЕ

Лашков В.А., Машек И.Ч., Анисимов Ю.И., Иванов В.И.

Санкт Петербургский государственный университет

Колесниченко Ю.Ф.

Институт Высоких Температур РАН, Москва

Азарова О.А.

Вычислительный Центр РАН, Москва

Микроволновый разряд является интересным газодинамическим объектом, который можно использовать для существенного изменения аэродинамического сопротивления тела. Вихревое движение в ударном слое на теле, вызванное взаимодействием возбужденной после СВЧ разряда области газа, с головной ударной волной, есть принципиальный механизм изменения сопротивления тела [1].

Получены новые результаты поведения лобовой и общей сил сопротивления в процессе взаимодействия тонкой ограниченной по длине области газа с пониженной плотностью с ударным слоем на затупленном цилиндре. Присутствие полости в цилиндре усиливает эффект уменьшения силы сопротивления при взаимодействии СВЧ разряда с телом. Обнаружено, что в этом случае сила лобового сопротивления может иметь два или три минимума. Численное моделирование основано на уравнениях Эйлера.

Проведены экспериментальные исследования поведения давления на лобовой поверхности затупленных тел, которые имеют внутреннюю полость, в условиях СВЧ разряда. Эксперименты подтвердили, что вдув газа в ударный слой синхронно с СВЧ разрядом усиливает вихревое движение, которое ведет к существенному снижению сопротивлению тела [2].

Литература:

1. Lashkov V.A., Mashek I.Ch., Anisimov Yu.I., Ivanov V.I., Kolesnichenko Yu.F., Ryvkin M.I., Gorynya A.A. Gas Dynamic Effect of Microwave Discharge on Supersonic Cone-shaped Bodies. AIAA 2004-671. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 5-8 January 2004, Reno, Nevada.

2. Lashkov V.A., Mashek I.Ch., Anisimov Yu.I., Ivanov V.I., Kolesnichenko Yu.F., Azarova O.A. Method of Vortex Flow Intensification under MW Filament Interaction with Shock Layer on Supersonic Body. AIAA 2006-404. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9-12 January 2006, Reno, Nevada.

21. COMBINATION OF GAS INJECTION AND MW DISCHARGE FOR DRAG REDUCTION UNDER SUPERSONIC FLIGHT

Lashkov V.A., Mashek I.Ch., Anisimov Yu.I., Ivanov V.I.

St-Petersburg State University

Kolesnichenko Yu.F.

Institute of High Temperatures RAS, Moscow

Azarova O.A.

Computing Centre of Russia Academy of Sciences, Moscow

The microwave discharge is an interesting object, making possible a substantial change of the bodies' aerodynamic drag. The principal mechanism, leading to the body's aerodynamic characteristics change is gas vortex motion caused by the interaction of the gas area excited by the discharge and the shock layer on the body [1].

New results on behavior of front drag force and total drag force during an interaction of a thin limited length low-density channel – cylinder shock layer have been obtained. Presence of the cavity in the cylinder body amplifies the effects of drag force reduction in the process of thin low density channel – shock layer interaction and the presence of two or three minimums in the front drag force dependence on time is possible. Numerical modeling is based on the Euler equations.

Experimental research has been conducted to study the pressure behavior on the blunt body's front surface in the circumstances of the microwave discharge, using a model with a hollow inside. The experiments have proved that the injection of gas into the shock layer synchronized with the microwave discharge boosts the vortex flow, which leads to a significant reduction of the body's drag [2].

References:

1. Lashkov V.A., Mashek I.Ch., Anisimov Yu.I., Ivanov V.I., Kolesnichenko Yu.F., Ryvkin M.I., Gorynya A.A. Gas Dynamic Effect of Microwave Discharge on Supersonic Cone-shaped Bodies. AIAA 2004-671. 42nd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 5-8 January 2004, Reno, Nevada.

2. Lashkov V.A., Mashek I.Ch., Anisimov Yu.I., Ivanov V.I., Kolesnichenko Yu.F., Azarova O.A. Method of Vortex Flow Intensification under MW Filament Interaction with Shock Layer on Supersonic Body. AIAA 2006-404. 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, 9-12 January 2006, Reno, Nevada.

22. СВЧ РАЗРЯДЫ В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ПОТОКЕ: ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА И ПРИМЕНЕНИЕ

**В.М.Шибков, А.Д.Абрамова, А.Ф.Александров, В.А.Черников, А.П.Ершов,
А.А.Карачев, Р.С.Константиновский, Л.В.Шибкова, В.В.Злобин**
Физический факультет МГУ им. М.В.Ломоносова, Москва

В докладе представлены результаты исследований низкотемпературной плазмы СВЧ разрядов, выполненные в течение последних лет на физическом факультете МГУ им. М.В.Ломоносова.

Показано, что импульсная мощность, необходимая для создания поверхностного СВЧ разряда в широком диапазоне давлений воздуха 10^{-3} – 10^3 Тор, не превышает величины 10^2 кВт. Разряд представляет собой тонкий плазменный слой, равномерно покрывающий внешнюю поверхность антенны. Скорость распространения разряда может достигать величины 100 км/с, что на несколько порядков величины превышает скорость звука в воздухе. Волна пробоя определяет скорость распространения поверхностного разряда в первые моменты его возникновения ($t=1-3$ мкс). Амбиполярная диффузия ответственна за механизм распространения разряда в стадии его развития ($t=3-100$ мкс), тогда как механизм медленного горения возможен только на стационарной стадии существования разряда ($t>100$ мкс). Электрическое поле локализовано в тонком приповерхностном слое толщиной ~ 1 мм. Большое значение приведенного электрического поля $E/n=100-500$ Тд ведет к эффективному вкладу энергии в плазму, то есть к быстрому нагреву газа и эффективной наработке активных и заряженных частиц. Температура газ достигает 1000-2000 К, а на начальной стадии формирования поверхностного разряда

наблюдается быстрый нагрев воздуха со скоростью ~ 70 К/мкс.

При формировании подавляющего большинства видов газового разряда используются одно- или многоэлектродные системы подвода энергии, что с практической точки зрения малоприспособно для дистанционного создания плазмы в заданной области пространства. И лишь безэлектродные системы, использующие для подвода электромагнитной энергии сфокусированные пучки, идеально подходят для этой цели. Свободно локализованный СВЧ разряд в волновых полях является одной из таких систем. В случае свободно локализованного разряда электрическое поле локализовано в области каустики сфокусированного СВЧ пучка. Эта локализация не зависит от того, что электромагнитная энергия фокусируется либо в неподвижный, либо в движущийся газ. А так как пробой газа в условиях свободно локализованного СВЧ разряда происходит за время меньшее, чем время протекания газа через область занятую разрядом, то разряд не сдувается сверхзвуковым потоком воздуха.

Экспериментально исследовано воспламенение сверхзвукового потока пропан-воздушной смеси с помощью свободно локализованного СВЧ разряда, поверхностного СВЧ разряда и комбинированного СВЧ разряда. Показано, что все типы СВЧ разрядов приводят к надежному воспламенению углеводородного топлива. Реализовано стационарное горение пропан-воздушного сверхзвукового потока в условиях комбинированного СВЧ разряда и разряда постоянного тока.

Для нахождения степени влияния различных каналов передачи энергии на воспламенение горючих сверхзвуковых потоков разработана кинетическая модель горения воздушно-углеводородных смесей, учитывающая влияние электрического поля на процессы диссоциации молекул и создания активных радикалов, возбужденных и заряженных частиц в условиях неравновесной газоразрядной плазмы. Выявлено сильное влияние величины приведенного электрического поля на индукционный период.

Работа поддержана Российским фондом фундаментальных исследований (проект РФФИ № 05-02-16532).

22. MICROWAVE DISCHARGES IN HIGH-SPEED FLOW: FUNDAMENTALS AND APPLICATION

V.M.Shibkov, A.D.Abramova, A.F.Aleksandrov, V.A.Chernikov, A.P.Ershov,
A.A.Karachev, R.S.Konstantinovskij, L.V.Shibkova, V.V.Zlobin
Physical Faculty of the Moscow State University

The results of researches of low-temperature non-equilibrium microwave plasmas which have been carried out at Physical Faculty of the Moscow State University within last several years are submitted in the report.

The surface microwave discharge is shown to represent a thin plasma layer that uniformly covers the antenna surface. In experiments, the peak pulse power necessary to excite the discharge in a wide range of air pressures from 10^{-3} to 10^3 Torr is no higher than 100 kW. The discharge propagation velocity may be as high as 100 km/s. The breakdown wave defines the velocity of the discharge at its early stages ($t = 1-3 \mu\text{s}$). Ambipolar diffusion governs the discharge propagation at the stage of its evolution ($t = 3-100 \mu\text{s}$), and, finally, slow surface combustion is possible only at the stationary stage of the discharge ($t > 100 \mu\text{s}$). The electric field is localized in a thin (~ 1 mm) surface layer. High values of the reduced electric field, $E/n = 100-500$ Td, provide efficient energy deposition to the plasma, i.e., favor the rapid heating of the gas and the efficient generation of charged particles. It is shown that the gas temperature may rise to 1000-2000 K, rapidly increasing (with a rate of ~ 70 K/ μs) at the early stage of discharge evolution.

Most of gas discharges are produced with the use of single- or multielectrode energy supply systems. From the practical standpoint, such systems are poorly suited to remotely control plasma production in a certain spatial region. Electrodeless systems in which freely

localized discharges are produced using focused microwave beams are best suited for this purpose. In a freely localized discharge, the electric field is localized in the waist region of a focused microwave beam. Gas breakdown in a microwave discharge occurs over a time that is shorter than the time during which the gas propagates through the discharge; therefore, the discharge is not blown off by the supersonic flow.

The ignition of supersonic flow of a propane-air mixture with use of freely localized microwave discharge, surface microwave discharge, and combined microwave-direct current discharge was experimentally investigated. It was shown, that the all types of the discharges result in a reliable ignition of hydrocarbon fuel. Combustion of a propane-air supersonic stream is realized under condition of the combined surface microwave and direct current discharge.

For finding-out of influence of different channels of energy transfer on ignition of combustible mixtures in supersonic flow the kinetic model of ignition of hydrocarbons-air mixtures at taking into account of influence of electric field on processes of dissociation molecules and creation of the active radicals, excited and charged particles under conditions of non-equilibrium plasma of the gas discharge was developed. Mathematical modelling has revealed strong influence of the reduced electric field on induction time.

The work was supported by the RFBR (grant #05-02-16532).

23. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ УСТРОЙСТВО ДЛЯ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА СТРУКТУРУ СВЕРХЗВУКОВОГО ОБТЕКАНИЯ ТЕЛА ВРАЩЕНИЯ

В.А. Сахаров, Н.П. Менде, С.В. Бобашев

Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе РАН, С.-Петербург

D. M. Van Wie

Johns Hopkins University, Laurel, Maryland, 20723, U.S.A.

В настоящей работе предложено, создано и испытано электромагнитное устройство, которое помещается внутри модели, обтекаемой сверхзвуковым потоком. Модель представляет собой цилиндр 28мм в диаметре, переходящий в конус с раствором 60°. Внутри цилиндрической части вблизи поверхности размещается магнитная катушка, содержащая 20 витков медного провода диаметром 1мм. Один конец катушки соленоида присоединен к электроду в виде металлического кольца, размещенного в месте сочленения цилиндра и конуса. Вдоль оси тела помещен центральный электрод, представляющий собой медный стержень 6мм в диаметре. Один конец стержня заканчивается конусом с раствором 60° и образует переднюю коническую часть модели. Второй конец стержня и второй конец катушки-соленоида соединены с выходами источника напряжения. В качестве источника импульсного напряжения используется линия с распределенными параметрами, состоящая из 14 LC ячеек, которая перед экспериментом заряжается до напряжения в диапазоне 300-700 В. В электрическую цепь питания устройства включен импульсный трансформатор, который инициирует разряд между двумя электродами: кольцом и передней конической частью стержня. Ток разряда, проходя по катушке, генерирует магнитное поле соленоида. Магнитное поле приводит разрядный шнур во вращение вокруг поверхности конуса под действием силы Лоренца в азимутальном направлении. В наших опытах типичные токи разряда составляли ~ 1кА, а длительность разряда 1.0-1.5 мс.

Модель помещалась в сверхзвуковой поток азота с параметрами: давление ~ 50 мбар, плотность газа ~ 0.04 кг/м³ (част/см³), температура ~ 400 К, скорость ~ 1600 м/с, число Маха 4, стационарные параметры потока сохранялись в течении ~ 1.5мс. В этих условиях с помощью специальной высокоскоростной фотографии измерялась частота вращения разрядного шнура. В зависимости от направления тока разряда частота вращения менялась от 15 до 30 кГц.

Картина обтекания модели сверхзвуковым потоком регистрировалась шлирен-

методом. Установлено, что ударно-волновая структура потока при генерации разряда существенно меняется по сравнению с картиной обтекания без магнитогидродинамического (МГД) воздействия. Конструкция предлагаемого устройства соединяет в себе все необходимые для организации эффективного МГД взаимодействия элементы (магнитный индуктор и систему электродов), делая возможным экспериментальное моделирование МГД процессов при внешнем обтекании. Ясный физический принцип и простота конструкции позволяют независимо изменять величины тока и магнитного поля, а также модифицировать рассмотренную схему устройства в плане изменения размеров модели и использования различных электродных систем в соответствии с задачами исследования.

Работа выполнена при поддержке EOARD (проект МНТЦ № 2009) и Программы Президиума РАН № 20 (2002-2005 гг.).

23. AN ELECTROMAGNETIC FACILITY FOR PRODUCING AN IMPACT ON A SUPERSONIC FLOW ABOUT A BODY OF REVOLUTION

V.A Sakharov, N.P. Mende, S.V. Bobashev

A.F. Ioffe Physico-Technical Institute of Russian Academy of Sciences, Saint-Petersburg

D. M. Van Wie

Johns Hopkins University, Laurel, Maryland, 20723, U.S.A.

The aim of the present work consists in designing, manufacturing, and testing an electromagnetic facility that can be housed inside a body abounding in a supersonic flow.

The model is a 60° sharp cone mated with a cylinder. The cylinder diameter is 28 mm. Inside the cylindrical part, near its surface there is a magnetic coil consisting of 20 turns of copper wire of 1 mm in diameter. Near the plane of mating the cone and cylinder there is a metal ring serving as an electrode connected with one end of the coil. Along the body axis the central electrode is located (brass bar of 6 mm in diameter with the conical nose part). The central electrode and the second coil end are connected with an external voltage source. The voltage source is a circuit consisting of *LC* cells charged up to needed voltage. In the circuit a pulsed transformer is connected in series. With the help of transformer an electric discharge is initiated between the central and ring electrodes. The discharge current flowing through the coil establishes the magnetic field. The magnetic field causes rotation of the linear electric discharge around the cone surface in the azimuthal direction. The heating of the gas by the electric current should cause variation of the flow parameters and flow structure as a whole.

The proposed device was tested in a supersonic nitrogen flow. The flow parameters in the mainstream in front of the model were: pressure 50 mbar, density 0.04 kg/m³, temperature 440 K, velocity 1600 m/s, and Mach number 4. The constancy of the parameters is retained during ~ 1.5 ms. The pulse of the electric current through the electromagnetic device possessed approximately the same duration and attained ~ 1 kA in amplitude. Two Schlieren patterns of the flow about the body of revolution – with no electrical discharge and with the presence of it demonstrated strong influence of the rotating electric discharge on the supersonic flow structure.

The frequency of rotation of the discharge was detected with the help of a high-speed photo recorder. This frequency depends on the direction of the electric current and in our experiments varied from 15 to 30 kHz.

The device described, in our opinion, paves the way to a new and interesting approach to magnetohydrodynamic (MHD) control of supersonic flows. The design of the device combines all components necessary for implementation of an effective MHD interaction – magnetic system and set of electrodes, and makes it possible to model MHD processes in external flows. Clear physical principle and simplicity of the design allow one to vary independently the current strength and magnetic induction, as well as to simply modify the device varying its dimensions and employing various systems of electrodes in accordance with the problem under study.

The work was supported by EOARD (ISTC project no. 2009) and Program no. 20 of the Presidium of RAS (2002–2005).

24. КИНЕТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ СВЧ ПОЛЯ С РАСПАДАЮЩЕЙСЯ ЛАЗЕРНОЙ ПЛАЗМОЙ В ВОЗДУХЕ

Ю. Ф. Колесниченко, Д. В. Хмара
Институт Высоких Температур РАН, Москва

Проведено численное моделирование распада лазерной плазмы, проанализированы режимы взаимодействия СВЧ поля с распадающейся плазмой лазерной искры. Целью кинетического моделирования являлась оценка условий инициации СВЧ разряда такой плазмой. Определялись временные интервалы, в течение которых остаточная концентрация электронов и плотность газовой среды достаточны для проникновения внешнего СВЧ поля. Проблема разделена на две последовательных задачи: моделирование распада лазерной плазмы и моделирование СВЧ взаимодействия с такой плазмой.

Для решения первой задачи принят подход, когда за начальные условия принимается состояние лазерной плазмы, которое экспериментально определено как термодинамически равновесное, ход температуры от времени берется из эксперимента [1], а далее кинетически рассчитывается электронная концентрация/проводимость в распадающейся области. Показано, что рекомбинационный характер распадающейся плазмы приводит к отклонению концентраций заряженных частиц от их термодинамических значений в сверхравновесную сторону. Это отличие становится все более заметным в процессе остывания газо-плазменной области. При низких температурах газа (порядка 3000K и ниже) рекомбинация ведет к быстрой деионизации плазмы. При этом внешнее СВЧ электрическое поле начинает проникать в плазму.

Три режима взаимодействия СВЧ пучка с распадающейся лазерной плазмой могут быть выделены при атмосферном давлении. Первый представляет собой инициацию СВЧ разряда на сильно проводящей лазерной плазме и по времени ограничен первыми 80 микросекундами. Второй режим представляет собой инициацию СВЧ разряда посредством пробоя разреженной и умеренно-проводящей области искры, когда СВЧ поле начинает проникать в нее. И последний режим является нагревом плазмы (или диссипацией энергии) в подпороговом невозмущенном поле, приводящим к генерации ударной волны. Этот режим простирается во времени до нескольких сотен микросекунд. Представлены зависимости выделенных режимов от исходного давления газа, интенсивности СВЧ волны и длительности микроволнового импульса.

Литература:

1. Glumac N., Elliott G., and Boguszko M. Temporal and Spatial Evolution of the Thermal Structure of a Laser Spark in Air. 43rd AIAA Aerospace Meeting and Exhibit, AIAA Paper 2005-204.

24. KINETIC MODELING OF MW FIELD INTERACTION WITH DECAYING LASER SPARK IN AIR

Yu. Kolesnichenko, D.Khmara
Institute of High Temperatures RAS, Moscow

Numerical investigation of laser plasma decay is carried out and regimes of MW filed interaction with decaying laser plasma are analyzed. The aim of kinetic modeling is in evaluation of conditions for MW discharge origination during MW interaction with decaying laser spark.

The conditions are in determination of the time range when residual electron concentration and medium density make the plasma domain transparent one for an external MW irradiation. The problem is divided into two successive tasks: the modeling of laser spark decay and modeling of MW interaction with decaying laser spark.

The idea is, starting from the plasma condition, which is experimentally detected as local thermal equilibrium and taking as a guiding parameter experimentally measured gas temperature evolution [1], calculate evolution of electron concentration/conductivity in decaying domain. It is shown that recombining character of decaying plasma results in deviation of charged particles concentration from their thermodynamic values to over-equilibrium ones. The difference becomes more and more significant while gas temperature goes down. At low gas temperatures (about 3000K and less) the recombination leads to rapid de-ionization of plasma domain. At the same time the incident electric field is able to penetrate inside this domain.

Three regimes of MW beam interaction with decaying laser plasma can be distinguished for atmospheric air pressure. The first is MW discharge initiation on highly conductive laser plasma and is limited by the first 80 μ s. The second regime is initiation of MW discharge via breakdown in rarefied and moderate-conductive spark domain when electric field begins to penetrate in it. And the last is spark plasma heating (or energy deposition) in sub-breakdown undisturbed field, resulting in shock waves generation. This regime ranges in time up to several hundreds of microseconds. The results of investigation of regimes dependence on gas pressure, MW field intensity and MW pulse duration are presented.

References:

1. Glumac N., Elliott G., and Boguszko M. Temporal and Spatial Evolution of the Thermal Structure of a Laser Spark in Air. 43rd AIAA Aerospace Meeting and Exhibit, AIAA Paper 2005-204.

25. АСИМПТОТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЧЕНИЕМ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ

И.И. Липатов

Центральный Аэрогидродинамический Институт (ЦАГИ), Моск. обл.

Исследованы локальные течения в ламинарных пограничных слоях в присутствии нагревательных элементов, расположенных на поверхности. На основе асимптотического анализа сформулированы математические задачи и найдены параметры подобия. Определены параметры, обеспечивающие управление течением (отрыв, устойчивость). Представлены результаты численного и аналитического анализа.

Среди различных методов управления течением в пограничных слоях одним из наиболее изучаемых в настоящее время является метод, связанный с выделением энергии вследствие электрического разряда или нагревания поверхности.

Цель настоящей работы заключается в анализе возможного влияния локального нагревания поверхности для определения влияния на течение в пограничном слое и в нахождении оптимальных параметров нагревательных элементов.

Предполагается, что на поверхности обтекаемого тела расположены участки, с температурой, отличной от температуры газа в невозмущенном пограничном слое. Предполагается также, что изменение температуры меняется со временем. Практически реализовать такой метод управления достаточно легко, используя полоски электропроводящего материала. Пример применения такого метода управления описан, например, в работе. [1]

Наиболее важным фактором, связанным с энергоснабжением при нагреве поверхности является изменение плотности в области, на которую влияет нагревание.

Структура течения в этой области определяется процессами конвекции и теплопроводности. Изменение плотности (уменьшение при нагреве) будет приводить к изменению толщины пограничного слоя. Ситуация в этом случае схожа с обтеканием локальных неровностей, расположенных на дне пограничного слоя, в случае нагрева эффективная неровность формируется из-за изменения плотности. Отличие состоит в том, что форма неровности, формирующейся при нагреве заранее неизвестна. Ранее проведенный анализ локальных течений около неровностей позволил сформулировать математические задачи и найти параметры, влияющие на течение в пограничном слое. [2]

Предполагается, что число Рейнольдса велико, но не превосходит критической величины, при которой может происходить ламинарно-турбулентный переход.

В работе проанализированы различные параметры областей локального нагрева. Показано, что математическая задача существенно зависит от продольных и поперечных масштабов области нагрева, а также от характерного масштаба времени (для нестационарных режимов нагрева). В результате анализа показана возможность устранения отрыва пограничного слоя за счет локального нагрева. Также показаны возможности управления развитием волн неустойчивости в пограничных слоях.

Для некоторых задач получены результаты численного решения. Эти результаты соответствуют нелинейным режимам, при которых изменения температуры являются конечными. Для относительно малых изменений температуры получены аналитические решения.

Представленные результаты представляют интерес при анализе и других методов управления течением. Например, энерговыделение за счет электрического разряда также может быть описано с использованием моделей, сформулированных для поверхностного нагрева.

В работе обсуждаются перспективы дальнейших исследований, связанные с проведением экспериментов и практическими приложениями нагрева для воздействия на отрыв (стационарный или нестационарный) и на различные виды неустойчивости.

Литература:

1. N. Yurchenko, G.Voropaev, R. Pavlovsky, P.Vinogradsky, A. Zhdanov, Flow control using variable temperature boundary conditions, 2003, *Proc. European Fluid Mechanics Conference EFMC-2003*, Toulouse 24-28 August, France.
2. В.Я. Нейланд, В.В. Боголепов, Г.Н. Дудин, И.И. Липатов. Асимптотические задачи сверхзвуковых течений вязкого газа 2004. Физматлит. 2004.

25. ASYMPTOTICAL MODELS OF BOUNDARY LAYER FLOW CONTROL

I.I. Lipatov

Central Aerohydrodynamic Institute (TsAGI), Moscow reg.

Investigated are local flows in the laminar boundary layers in the vicinity of heating elements. On the basis of asymptotical analysis mathematical models are formulated and similarity parameters are found. Determined are flow parameters providing flow control (separation, transition). Presented are results of numerical and analytical analysis.

Among different methods of boundary layer flow control one of the mostly investigated now is a method associated with energy release due electrical discharge, surface heating or cooling.

The aim of this paper is the analysis of possible application of the local surface heating to determine response of the boundary layer flow and to find optimal heating elements parameters.

It is supposed that on the surface of the body are located heated parts, having temperatures different from the gas temperature in ambient boundary layer flow. It is supposed that

temperature difference may change with time. Practically this method is easy to fulfill using electrically conducting strips. Example of such method application is described for example in ¹.

The most important factor due to energy release (surface heating) is density change in the region influenced by the heating. This region structure is controlled by the convection and thermal conductivity processes. At the same time density change (diminishing due to temperature rise) will change boundary layer thickness. Situation is similar to the local flow nearby local surface distortion, but in our case effective surface distortion is created due to temperature (density) change. The difference is that the distortion shape is not known beforehand but is formed due to energy release in the boundary layer and due to the region with smaller density formation. Previous analysis of the disturbed flow nearby local surface distortions allowed to develop corresponding mathematical problems and to find distortions parameters influencing boundary layer flow ².

It is supposed that the Reynolds is large but lesser than the critical value at which laminar-turbulent transition can take place.

Different parameters of heated strips were analyzed. It is shown that mathematical problem describing disturbed flow strongly depends on the heated parts longitudinal and transversal scales along with characteristic time parameter (if heating depends on time). As a result of analysis possibility of boundary layer suppression due to surface heating control are demonstrated. Also shown opportunities to control instability parameters like Tollmien-Schlichting waves amplitudes etc.

For some formulated mathematical problems numerical results are obtained. These results correspond to the nonlinear regimes when temperature difference is finite. For relatively small temperature difference linear problems are formulated. Presented are analytical solutions for linear problems.

Results obtained will be useful as well to another methods of control analysis. For example, energy release in the boundary layer due to electrical discharge partially may be described on the basis of models appropriate for surface heating.

Discussed are prospects of future work primarily associated with experimental verification of theoretical results and practical applications to influence boundary layer separation (steady or unsteady) and different forms of instability.

References:

1. N. Yurchenko, G.Voropaev, R. Pavlovsky, P.Vinogradsky, A. Zhdanov, Flow control using variable temperature boundary conditions, 2003, *Proc. European Fluid Mechanics Conference EFMC-2003*, Toulouse 24-28 August, France.
2. V.Ya. Neyland, V.V. Bogolepov, G.N. Dudin, I.I. Lipatov. Asymptotical problems of the supersonic viscous gas flows. 2004. 456 p. (in Russian)

26. СВОЙСТВА МИКРОВОЛНОВОГО СТРИМЕРНОГО РАЗРЯДА В ВОЗДУХЕ ПРИ РАЗЛИЧНОЙ ЕГО ВЛАЖНОСТИ И В ПРИСУТСТВИИ ВОДЯНОГО АЭРОЗОЛЯ

И.И. Есаков, Л.П. Грачев, К.В. Ходатаев

ФГУП «Московский радиотехнический институт РАН»

В.Л.Бычков

Московский государственный университет

В настоящее время микроволновый стримерный разряд в газах достаточно хорошо исследован. Ряд свойств, характерных для этих разрядов, таких как высокая эффективность поглощения ЭМ энергии, высокая температура в плазменных каналах,

сверхзвуковая скорость распространения фронта разряда и т.д., делает эти разряды привлекательными для применения в целом ряде областей науки и технологии, в том числе в плазменной аэродинамике и для создания систем зажигания и стабилизации горения горючих смесей. В связи с этим особенно актуальными становятся исследования количественных характеристик микроволновых разрядов при различных параметрах электромагнитного излучения и газа, важных для их практических приложений.

Из опыта экспериментальных исследований известно, что характеристики микроволнового разряда зависят от свойств окружающего газа. Например, пробойное поле может существенно отличаться при различной его влажности из-за появления дополнительных процессов исчезновения электронов вследствие процессов прилипания и рекомбинации на молекулах и ионах воды. Экспериментальные данные измерений этих величин для микроволнового разряда в настоящее время отсутствуют. В тоже время в реальных условиях воздух имеет различную влажность в зависимости от высоты над землей, погодных условий и может содержать аэрозоль. Поэтому необходимо знать, какова зависимость пробойного поля от влажности, так как это непосредственно определяет, в частности, мощность генератора микроволнового излучения, используемого для создания разряда.

Настоящий доклад посвящен результатам экспериментальных исследований микроволновых стримерных разрядов при различной влажности и в присутствии водного аэрозоля, как в неподвижном воздухе, так и в его скоростном потоке. Эксперименты проведены для разрядов, создаваемых ЭМ излучением с различной длиной волны в широком диапазоне давлений воздуха и уровня поля, как в импульсном, так и в квазинепрерывном режиме горения разряда.

26. FEATURES OF MICROWAVE STREAMER DISCHARGE IN AIR AT ITS DIFFERENT HUMIDITY AND AT PRESENCE OF WATER AEROSOL

I.I.Esakov, L.P.Grachev, K.V.Khodataev
FSUE «Moscow radiotechnical institute RAS»
V.L.Bychkov

M.V. Lomonosov Moscow state university

Nowadays microwave (MW) streamer discharge in gases is studied enough well. Such typical properties of these discharges as high efficiency of electromagnetic (EM) energy absorption, high temperature in plasma channels, supersonic velocity of discharge front propagation, etc., make them attractive for applications in a number of scientific and technology areas including plasma aerodynamics, creation of flammable mixture ignition and combustion stabilization systems. So, investigations of quantitative MW discharge characteristics at different parameters of EM radiation and a gas are of great interest.

Our experimental experience has shown that MW discharge characteristics depend on properties of ambient gas. For example, the breakdown field can be substantially different at various air humidity because of increase of recombination and attachment processes caused by presence of water ions and molecules. Experimental data of these characteristics for MW discharges are absent now. At the same time air in real conditions is characterized by different humidity with respect to the altitude, weather and can contain a water aerosol.

Also it is very important to know breakdown field as a function of humidity since this characteristic directly determines MW radiation generator power which is necessary for this discharge creation.

The present report is devoted to results of MW streamer discharge experimental investigations in air at its different humidity and at presence of water aerosol both in motionless air and in high-speed flow. Experiments were carried out with discharges created by EM radiation at different wavelengths in wide range of air pressure and levels of MW field both in

27. РАСПРОСТРАНЕНИЕ УДАРНЫХ ВОЛН В СРЕДЕ С РЭЛЕЕВСКИМ МЕХАНИЗМОМ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

Н.А. Герасимов В.С. Сухомлинов, С.В.Сухомлинов

Научно-исследовательский институт физики СПбГУ, Санкт-Петербург, Ст.Петергоф

В.В. Кучинский

Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем, Санкт-Петербург,

В работе в общем случае в одномерном приближении рассмотрено влияние известного Релеевского механизма энерговыделения в упругой среде [1,2], играющего важную роль, в частности, в плазме газового разряда, на структуру бегущей ударной волны (УВ). Получено уравнение распространения (УВ) для этого случая. Найдено аналитическое решение уравнения для малых значений параметра, характеризующего свойства среды. Проанализирован характер решения при разных знаках этого параметра и его значениях по модулю порядка единицы. Обнаружено, что при положительных значениях этого параметра УВ в виде «ступеньки» в такой среде ослабляется и вырождается в возмущение в виде одиночного горба. При отрицательных значениях – напротив, УВ усиливается. Установлено, что для наличия стационарного в системе координат связанной с волной решения распространения УВ в среде с Рэлеевским механизмом энерговыделения необходимо наличие границы среды вниз по потоку от ударного слоя. Ее положение соответствует так называемому «критическому» энергоподводу [21], и в этой точке местное число Маха равно единице. Установлено, что при положительном значении параметра среды с Рэлеевским энерговыделением существует предельное его значение, при превышении которого уравнение распространения не имеет стационарного решения ни при каком положении границы среды вверх по потоку от ударного слоя. Полученные результаты позволяют перейти к анализу особенностей распространения УВ в слабоионизованной плазме газового разряда.

Рассматриваются численные и приближенные методы решения уравнения распространения УВ в широком диапазоне параметров энерговклада, и приводится оценка областей применения и точности полученных аналитических формул.

Суть Релеевского механизма заключается в том, что если первоначально однородная упругая среда обладает тем свойством, что при возникновении в этой среде области с повышенной плотностью в ней будет происходить дополнительное выделение тепла, то в такой среде упругие волны малой амплитуды будут усиливаться [1,3]. Если же наоборот, происходит поглощение тепла, то волны будут ослабляться. В работах [2, 3, 4] показано, что основным механизмом взаимодействия акустических волн с низкотемпературной плазмой газового разряда и является Релеевский механизм. Вполне ясно, что независимо от природы возникновения и величины упругого возмущения наличие Рэлеевского механизма будет оказывать влияние на динамику этого возмущения, в том числе и на УВ.

Взаимодействие ударных волн с газоразрядной плазмой изучалось экспериментально и теоретически многими авторами [7-10]. Актуальность подобных работ обусловлена попытками разработки нетрадиционных методов оптимизации аэродинамических характеристик летательных аппаратов – снижения лобового сопротивления, увеличения подъемной силы и т.д. В результате большого числа исследований выявлены различные аномалии при сверхзвуковом полете тел различной формы в слабоионизованной плазме атомарных и молекулярных газов [11, 12]. В других работах при исследовании распространения бегущих УВ в газовом разряде, аналогично, наблюдались значительные изменения структуры УВ [13, 14]. В настоящее время в литературе интенсивно обсуждается вопрос о том, как наличие электрического поля и

слабой ионизации газа влияет на структуру УВ. В одних работах утверждается, что влияние плазмы ограничивается лишь изменениями УВ при прохождении тепловой ямы [15, 16], в других – что существуют так называемые «специфические механизмы» влияния плазмы на структуру УВ [17, 18].). Для прикладных задач, например, в аэродинамике, весьма интересна слабоионизованная плазма (степень ионизации менее 10^{-5}), а также слабые УВ. Следует отметить, что плазма самостоятельного газового разряда – не единственный пример среды с Рэлеевским механизмом энерговыделения. Другим таким примером может служить газовая среда, в которой происходят химические реакции с выделением (поглощением) тепла.

Литература:

1. J. W. Strutt, Baron Rayleigh, "The theory of sound", 1926, Max and Co. Limited, London v.IV.
2. Александров Н.А., Напартович А.П., Паль А.Ф., Серов А.О., Старостин А.Н., «Усиление звуковых волн в плазме газового разряда», Физика плазмы, т. 16, в. 7, 1990, стр. 862-870.
3. V.S. Soukhomlinov, V.Y. Kolosov, V.A. Sheverev, M.V. Otugen, "Acoustic dispersion in glow discharge plasma. A phenomenological analysis", Phys. Fluids., v. 14, № 1, pp. 427-429, 2002.
4. Напартович А.П., Старостин А.Н., «Механизмы неустойчивости тлеющего разряда повышенного давления», Химия плазмы, в. 6, 1973, Москва, «Атомиздат», стр. 153-208.
5. F. Bastein, «Acoustics and gas discharge applications to loudspeakers», J. Phys. D, Appl. Phys., (20), 1987, pp. 1547-1557.
6. Остроумов Г.А., «Новый класс электроакустических преобразователей. Газовые преобразователи», Акустический журнал, т. XXVIII, вып. 2, 1982, стр. 268-270.
7. Basargin I.V. and Mishin G.I., 1984, Publication of the Ioffe Physico-Technical Institute, № 880, Leningrad (in Russia).
8. Ganguly B.N., Bleitzinger P., Garscalden A., "Shock wavedamping and dispersion in nonequilibrium low pressure argon plasmas", Phys. Lett. A, 19198, v. 230, p. 218.
9. Klimov A.I., Koblov A.N., Mishin G.I., Serov Yu.L. and Yavor I.P., 1982, "Shock wave propagation in a glow discharge", Sov. Tech. Phys., v. 8, № 4, pp. 192-194.
10. D.M. Van Wie, L.A. Matterns, K.R. Grossman, L. Gauthier, D. Donohue, H. Ku and Mishin G.I., "Overview of plasma aerodynamics research at JHU/APL" 2nd Workshop on the Application of weakly ionized flows for aerospace applications, Norfolk, 1998.
11. Mishin G.I., Serov Yu.L., Yavor I.P., "Flow around a sphere moving supersonically in a gas discharge plasma", Sov. Tech. Phys. Lett., 1991, v. 17, № 6, pp. 413-416.
12. Bedin A.P., Mishin G.I., "Ballistic studies of the aerodynamic drag on a sphere in ionized air", Sov. Tech. Phys. Lett., 1995, v. 21, № 14, pp. 5-7.
13. Basargin I.V. and Mishin G.I., "Precursor of shock wave in glow discharge plasma", Sov. Tech. Phys. Lett., 1989, v. 5, № 4, pp. 311-313.
14. V.A. Gorshkov, Klimov A.I., Mishin G.I., A.B. Fedotov, Yavor I.P., "Behavior of electron density in weakly ionized nonequilibrium plasma with propagating shock wave", Sov. Tech. Phys., 57, pp. 1893-1898.
15. Найдис Г.В., Румянцев С.В., «О движении ударной волны через тепловую неоднородность», Теплофизика высоких температур, 1987, т. 25, стр. 389-390.
16. V.S. Soukhomlinov, V.Y. Kolosov, V.A. Sheverev, M.V. Otugen, "Formation and propagation of a shock wave in a gas with temperature gradients", J. Fluid Mech., 2002, v. 473, pp. 245-264.
17. I.V. Adamovich, V.V. Subramaniam, J.W. Rich, "Phenomenological analysis of shock wave propagation in weakly ionized plasmas", AIAA J., v. 36, № 5, 1998, pp. 816-822.
18. И.В. Басаргин, Г.И. Мишин, «Распространение ударных волн в аргоне», Письма в ЖТФ, 1985, т. 11, № 21, стр. 1297-1303.

19. А.Л. Великович, М.А. Либерман, «Физика ударных волн в газах и плазме», Москва, «Наука», 1987, 295 стр.
20. Голятин В.Ю., Кучинский В.В., Сухомлинов В.С., «Влияние внешнего энергоподвода в область ударного слоя на параметры ударной волны», ЖТФ, 2005, т. 75, вып. 4, стр. 25 - 30.
21. Голятин В.Ю., Кучинский В.В., Сухомлинов В.С., «Влияние внешнего энергоподвода в область ударного слоя на структуру ударной волны», ЖТФ, 2005, т. 75, вып. 5, стр. 52 - 59.
22. В.Ф. Зайцев, А.Д. Полянин «Справочник по обыкновенным дифференциальным уравнениям» Москва, «Физико-математическая литература», 2001, 576 стр.
23. С.А. Ломов, «Введение в общую теорию сингулярных возмущений», Москва, «Наука», 1981, 398 стр.
24. Л.А. Вулис, «Термодинамика газовых потоков», Москва - Ленинград, «Госэнергетическое издание», 1950, 303 стр.
25. Антинян М.А., Галечан Г.А., Мкртчян А.Р., Таваликян Л.Б., «Влияние звука на продольное электрическое поле в разряде азота», Физика плазмы, 1991, т. 17, в. 12, стр. 1490-1494.
26. Ю.И. Чутов, В.Н. Подольский, «Ударные волны в газоразрядной плазме», Инженерно-физический журнал, т.62, № 5, 1992, стр. 707-713.
27. Ю.П. Райзер, «Физика газового разряда» Москва, «Наука», 1987, 591 стр. Carlo Cercignani, "Theory and application of the Boltzman equation", Edinburgh and London, 1975, 495 pp.

28. NUMERICAL SIMULATION OF DC GLOW DISCHARGES FOR HIGH-SPEED FLOW CONTROL

Jonathan Poggie

Senior Aerospace Engineer, US Air Force Research Laboratory

A numerical study of glow discharges was carried out in order to evaluate their potential for flow control applications. As part of this project, a three-dimensional computer code has been written to solve, in an implicit, loosely-coupled fashion, the fluid conservation laws, the charged particle continuity equations under the drift-diffusion model, and the Poisson equation for the electric potential. Fully three-dimensional calculations have been carried out for DC discharges in nitrogen, and changes in the flow in the presence a discharge have been demonstrated. In computations of a three-dimensional electrode configuration mounted on a flat plate in a Mach 5 crossflow, the discharge was found to thicken the boundary layer. The resulting compression waves led to increased pressure forces at the plate surface. These changes in flow structure occurred through dissipative heating; the body force term in the fluid momentum equation was negligible. The computations are in qualitative agreement with total temperature measurements made in a similar configuration for air flow (Menart et al., AIAA Paper 2003-2262). A preliminary investigation of the effect of an applied magnetic field has also been carried out. A computation of a simple discharge between parallel plates showed that an applied axial magnetic field tends to suppress the radial component of the current density.

29. ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИММЕТРИЧНОГО ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОГО БАРЬЕРНОГО РАЗРЯДА

А.В. Лиханский, М.Н. Шнейдер, С.О. Мачерет, Р.Б. Майлс

Princeton University, Princeton, New Jersey 08544

В последнее время широко исследуется возможность влияния неравновесной плазмы на газовые потоки. Взаимодействие происходит путем нагрева газа или передачи импульса от заряженных частиц нейтральным. Для предотвращения отрыва погранслоя было предложено использовать асимметричный диэлектрический барьерный разряд (АДБР). АДБР состоит из двух электродов, разделенных диэлектриком (рис.1). Нижний электрод заземлен, а к верхнему приложено высоковольтное напряжение. Рядом с острием верхнего электрода при подаче напряжения образуется плазма. В экспериментах Корке, Пост, Маклафина, Энло в университете Нотр Дама и Академии ВВС, а также Леоновым в ИФТАНе было показано, что при подаче синусоидального напряжения (2-20 киловольт, 1-100 килогерц) газ толкается слева направо со скоростью несколько метров в секунду.

В данной работе представлены результаты численного моделирования АДБР в воздухе, и на их основе объяснены физические принципы работы АДБР. Модель рассматривает динамику электронов, положительных и отрицательных ионов в нейтральном газе. Наличие в модели отрицательных ионов важно для понимания физики АДБР. Движение заряженных частиц описано в диффузионно-дрейфовом приближении. Из-за того, что скорость газа мала по сравнению с дрейфовой скоростью заряженных частиц, газ считается стационарным. В модель включены процессы ионизации, рекомбинации, прилипания и отлипания.

С помощью данного кода был промоделирован АДБР с поданным синусоидальным напряжением различных амплитуд напряжения и частот. Показаны механизмы толкания газа в каждом из полупериодов (положительная корона в анодной фазе и отрицательная корона (отрицательные ионы) в катодной). На основе моделирования было предложено использовать принципиально иной механизм толкания газа, а именно подача повторяющихся наносекундных отрицательных импульсов напряжением на высоковольтный электрод и поддержание постоянного положительного напряжения на электроде между импульсами. Во время импульса происходит пробой, электроны за наносекунды заносятся на диэлектрик, запирая разряд, а около острия высоковольтного электрода образуется облако положительных ионов. В анодной фазе положительные ионы дрейфуют к отрицательно заряженному диэлектрику, толкая газ и нейтрализуя электроны на диэлектрике.

В модели найдены силы, действующие со стороны плазмы на газ, и рассчитан тепловой нагрев. Из-за малости газовых времен по сравнению с плазменными, усредненная сила, толкающая газ, может быть подставлена в уравнение для погранслоя. Такой расчет был проведен и его результаты также будут представлены на конференции.

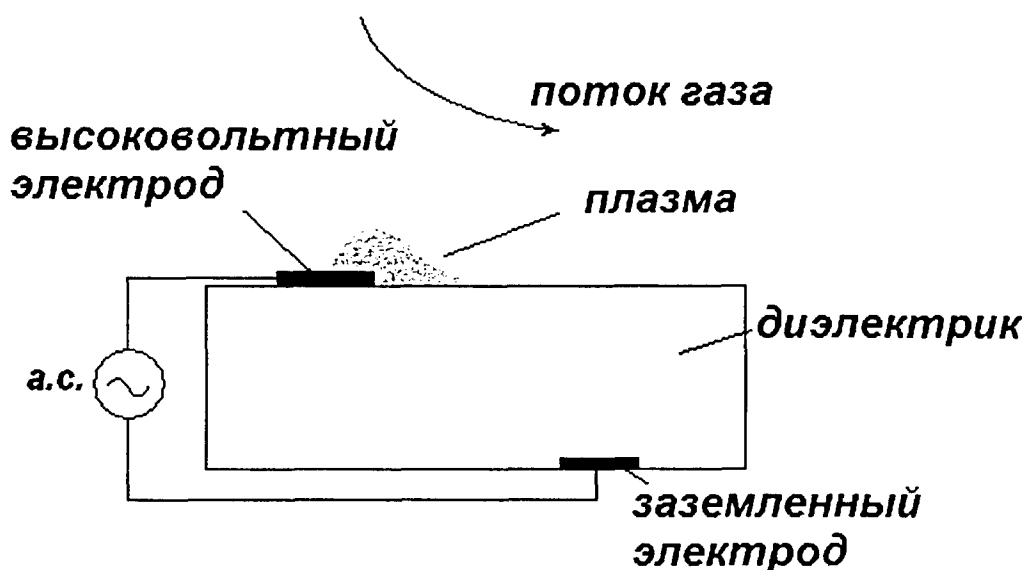


Рис.1. Асимметричный диэлектрический барьерный разряд.

29. NUMERICAL MODELING OF PLASMA ACTUATOR

Alexander V. Likhanskii, Mikhail N. Shneider, Sergey O. Macheret, and Richard B. Miles
Princeton University, Princeton, New Jersey 08544

Electromagnetic devices can be used for different manipulations on the flow. The interaction can be caused by collisions of charged particles with neutral gas or by heating the gas in the region of interaction. There is also a possibility of power extraction in near the surface using MHD effects. Different configurations can be used for these purposes. In our group the snow-plow arc concept was recently developed. It allows driving the discharge in the flow using magnetic field. Russian groups at the Institute of High Temperatures (S. Leonov et al.) have investigated flow control with high-current quasiequilibrium surface arcs. These researches refer to the high-speed flow control. However, significant results have been obtained by T. Corke and his colleagues at Notre Dame, Air Force Academy, and other institutions on the use of single dielectric barrier discharge for low-speed flow separation control.

The in present work the detailed physical model for asymmetric dielectric barrier discharge (DBD) in air is developed. Modeling of DBD with applied sinusoidal voltage is carried out. The leading role of charging the dielectric surface by electrons in the cathode phase is shown to be critical, acting as a harpoon that pulls positive ions forward and accelerates the gas in the anode phase. The positive ion motion back towards the exposed electrode is shown to be a major source of inefficiency in the sinusoidal or near-sinusoidal voltage cases. Based on understanding of the DBD physics, an optimal voltage waveform is proposed, consisting in high repetition rate short (a few nanoseconds in duration) negative pulses combined with positive dc bias applied to the exposed electrode. The velocity of near-surface gas jet produced by the DBD actuator thus optimized is shown to be considerably (potentially – by 1-2 orders of magnitude) greater than that for a sinusoidal signal with similar parameters.

The different time scales of plasma and hydrodynamic processes allowed us putting the time-averaged plasma force on the flow in the Navier-Stokes equation for the boundary layer problem. The possibility of influence on the boundary layer has been shown.

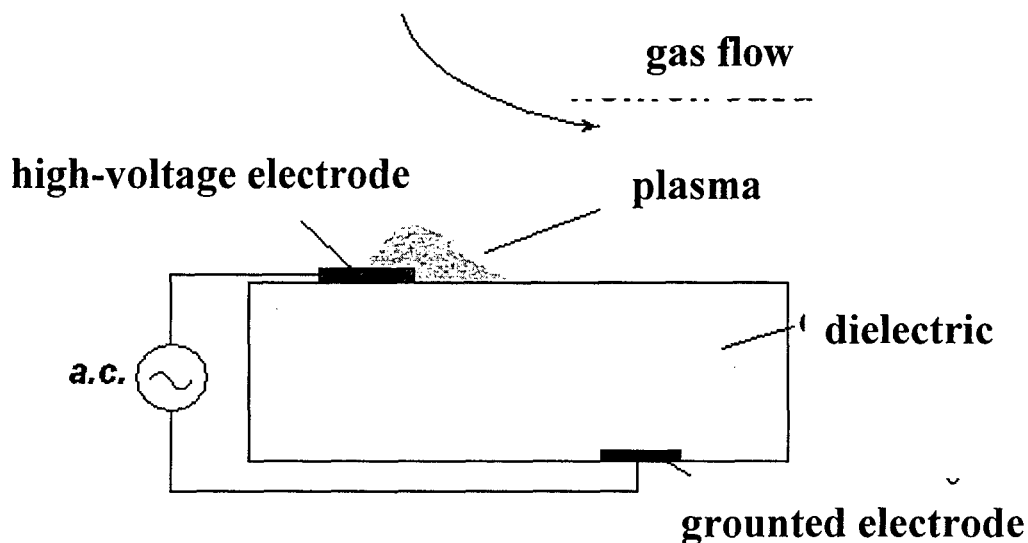


Fig.1 Asymmetric dielectric barrier discharge

30. ГИПЕРЗВУКОВЫЕ ПЛАЗМЕННЫЕ СТРУИ, ГЕНЕРИРУЕМЫЕ КВАЗИСТАЦИОНАРНЫМ МАГНИТО-ПЛАЗМЕННЫМ КОМПРЕССОРОМ И ИХ ПРИМЕНЕНИЯ В ПРИКЛАДНОЙ ПЛАЗМОДИНАМИКЕ.

Машек И.Ч., Лашков В.А., Анисимов Ю.И.

Санкт-Петербургский Государственный Университет

Колесниченко Ю.Ф.

Объединенный Институт Высоких температур, Москва

Квазистационарный магнито-плазменный компрессор (МПК) был разработан в СССР в 1960-1980 годах. [1,2] Такие коаксиальные разрядные системы создавались для инъекции предварительно нагретой плазмы в устройства типа ТОКАМАК. При различных режимах работы МПК генерируют сфокусированные плазменные струи различных газов (H_2 , He, N_2 , Ar, Воздух) со сравнительно высокой плотностью в области компрессии (более чем $(10^{16}-10^{18})\text{ см}^{-3}$), температурой около 1-3 eV, скоростью газа в фокусе струи 5-70 км/с. Типичная длительность импульса тока в этом типе ускорителя 100-200 μs , его амплитуда 50-200 кА, время жизни струи плазмы около 80-100 μs .

Результаты наших первых экспериментов [3] показывают, что свойства струй, генерируемых МПК (при работе МПК в режиме остаточного газа) допускают их использование в прикладной плазмодинамике. В представленной работе обсуждаются возможности использования плазменных струй, генерируемых МПК в экспериментальных исследованиях, связанных со следующими важнейшими направлениями:

Гиперзвуковая аэродинамика. В этой области плазменные струи МПК могут быть использованы как тестовые для экспериментального моделирования процессов взаимодействия гиперзвуковых плазменных потоков с различными материалами и телами. Существующие параметры струй в МПК позволяют проводить исследования процессов формирования ударных волн для очень интересного и важного диапазона скоростей 5-20 км/с.

Смешение сверхзвуковых нейтральных потоков и гиперзвуковых плазменных струй. Возможности МПК создавать компрессионные струи плазмы в сравнительно плотной среде позволяют использовать их для инъекции плазмы в стандартные аэродинамические сверхзвуковые потоки. Это может быть также интересно для контроля потоков в гиперзвуковых двигателях, а также в МГД приложениях.

Литература:

1. Асташинский В., Баканович Г., Минько Л. Исследование динамики плазмообразования и процессов формирования компрессионной области в магнито-плазменном компрессоре. ЖПС, вып.33,1980, с.629-633.
2. Морозов А. Принципы коаксиальных квазистационарных плазменных ускорителей. Физика плазмы, вып.16, 1990, с. 131-146.
3. Mashek I.Ch., Lashkov V.A., Anisimov Yu.I., Kolesnichenko Yu.F. Quasi-Stationary Magneto-Plasma Compressor For Investigation of Plasma Jets in Aerodynamic, 44th AIAA Aerospace Meeting and Exhibit, January 2006, Reno, NV, paper AIAA 2006-1458.

30. HYPERSONIC PLASMA JETS GENERATED BY QUASI-STATIONARY MAGNETO – PLASMA COMPRESSOR AND THEIR APPLICATIONS FOR APPLIED PLASMA DYNAMICS

Mashek I.Ch., Lashkov V.A., Anisimov Yu.I.

St-Petersburg State University

Kolesnichenko Yu.F.

Institute of High Temperatures RAS, Moscow

Quasi-stationary Magneto - Plasma Compressor (MPC) had been developed in the USSR on the period of 1960-1980 years [1,2]. These coaxial discharge systems were created for injection of preliminary heated plasma in TOCAMAC. Under different operational modes MPC generates the focusing plasma jets of different gases (H_2 , He, N_2 , Ar, Air) with comparatively high density in compression area (up to $(10^{16}-10^{18})\text{ cm}^{-3}$), temperature about 1-3 eV, gas velocity in jets focus 5-70 km/sec. The typical duration of current impulse in this type of accelerators is 100-200 μs , its amplitude 50-200 kA, the jet lifetime is about 80-100 μs .

Results of our first experiments [3] show that properties of MPC generated jets (for Residual-Gas -Regime of MPC) allow their using in applied plasma dynamics. In presented work the possibilities of using MPC generated jets for experimental investigations in the next very important directions are discussing:

Hypersonic aerodynamics. In this area plasma jets of MPC may be used as testing flow for experimental modeling of interaction processes of hypersonic plasma flows with different materials and bodies. Existing parameters of MPC jets permit to realize the investigations of bow shock formation processes for very interesting and important diapason of plasma velocity - 5-20 km/s, density and temperatures.

Mixing of supersonic neutral flows and hypersonic plasma jets. The possibilities of MPC to create a compressible plasma flows in comparatively dense media allow to use it for plasma injection in standard aerodynamic supersonic flows. It may be interesting for flow control problems in supersonic engines and MHD applications.

References:

1. Astashinsky B., Bakanovich G., Minko L. Investigations of dynamic of plasma arising and forming processes of compression area in gas magneto-plasma compressor. Journal of Applied Spectroscopy, Vol. 33, 1980, p.629-633.
 2. Morozov A. The principles of coaxial quasi stationary plasma accelerators. Physics of Plasma, vol.16, 1990, p.131-146.
 3. Mashek I.Ch., Lashkov V.A., Anisimov Yu.I., Kolesnichenko Yu.F. Quasi-Stationary Magneto-Plasma Compressor For Investigation of Plasma Jets in Aerodynamic, 44th AIAA Aerospace Meeting and Exhibit, January 2006, Reno, NV, paper AIAA 2006-1458.
-

Стеновые доклады Authors Post Papers

1. ИССЛЕДОВАНИЕ СВЧ РАЗРЯДА, ИНИЦИИРОВАННОГО ЛАЗЕРНЫМ ИЗЛУЧЕНИЕМ В ВОЗДУХЕ

В.Бровкин, Ю.Колесниченко, Д.Хмара

ИВТ РАН, Москва

И.Машек, В.Лашков

С.-Петербургский Государственный Университет, С.-Петербург

Изучена возможность инициации СВЧ разряда лазерной искрой в широком диапазоне давлений воздуха. В экспериментах достигнута устойчивая инициация безэлектродного СВЧ разряда атмосферного давления лазерной искрой, создаваемой Nd:YAG лазером (длительность импульса 15нс) на второй гармонике. Измерены пороги СВЧ пробоя при различных давлениях воздуха и уровнях энергии лазера. При включении лазера наблюдается пробой на пониженных интенсивностях СВЧ поля. Проявляется эффект стабилизации СВЧ пробоя лазерным излучением допробойных уровней. Инициация СВЧ разряда лазерной искрой достигается как при одновременном действии лазерного и СВЧ импульсов, так и в случае задержки СВЧ импульса относительно лазерного. Величина задержки в большой степени зависит от давления воздуха, увеличиваясь от 220 микросекунд при атмосферном давлении до 100миллисекунд при 70 мм.рт.ст. Наблюдается развитие СВЧ разряда вдоль лазерного луча, но поперёк СВЧ луча. Возникающие поперек СВЧ луча структуры такие же, как те, что формируются при распространении вдоль СВЧ луча [1]. Представлены предварительные результаты изучения СВЧ разряда, иницированного Nd:YAG лазером излучающим на четвёртой гармонике. Эти данные сравниваются с ранее полученными на второй гармонике.

Демонстрируется также возможность инициации СВЧ разряда микросекундной длительности искрой рубинового лазера в неподвижном воздухе атмосферного давления. Определены предельные задержки, при которых еще наблюдается взаимодействие СВЧ излучения с распадающейся лазерной плазмой. Их значения оказались порядка 300мкс. Определен уровень СВЧ энергии, вложенной в остаточную лазерную плазму. Теневым методом зафиксированы ударные волны, возникающие в разрядной области в результате взаимодействия СВЧ с плазмой лазерной искры. Представлены первые результаты инициации СВЧ разряда лазерной искрой в сверхзвуковом потоке.

Выполнены также численные исследования распада лазерной плазмы и анализируются процессы взаимодействия СВЧ поля с распадающейся лазерной плазмой.

Литература:

1. V. G. Brovkin, Yu. F. Kolesnichenko. "Structure and dynamics of stimulated microwave gas discharge in wave beams". J. Moscow Phys. Soc. 5 (1995) 23 - 38.

1. INVESTIGATION OF LASER-INDUCED MICROWAVE DISCHARGE IN AIR

V.Brovkin, Yu. Kolesnichenko, D.Khmara

IHT RAS, Moscow,

I. Mashek, V. Lashkov

St.-Petersburg State University, St.-Petersburg

The possibility of laser spark initiation of microwave discharge in quiescent air in wide range of air pressure has been investigated. The stable electrodeless MW discharge initiated by

laser spark produced on the second harmonics of Nd:YAG laser with 15ns-pulse duration in air under the atmospheric pressure is realized. The MW breakdown thresholds under the variation of radiated laser energy and air pressure are measured. Stable breakdown at reduced MW field intensity is registered under a laser beam action. The effect of MW breakdown onset/stabilization in the presence of sub-breakdown intensity of laser beam is eliminated. The initiation ability of laser spark over MW pulse delay depends substantially upon air pressure and changes from 220 μ s under the normal conditions to more than 100ms under 70Torr. MW discharge development in the direction of sub-breakdown laser beam, but across MW beam is observed. This effect is analogous to laser triggering of DC spark. The arising discharge structures are the same as are developing along MW beam [1]. Preliminary results of initiation of MW discharge by Nd:YAG laser beam on the fourth harmonic are presented and compared with those for laser beam on the second harmonic.

The possibility of Ruby laser spark initiation of 1 μ s pulse duration MW discharge in quiescent air under the atmospheric pressure was also demonstrated. The critical delays for MW radiation coupling with decaying laser plasma, exceeding 300 μ s were determined. The additional energy input due to MW energy deposition was recorded. The shock waves, arising after laser-induced MW discharge in air under the normal conditions, are registered by means of the Shlieren system. The first results of MW laser-induced discharge in supersonic flow are presented.

Numerical investigation of laser plasma decay is carried out and regimes of MW filed interaction with decaying laser plasma are analyzed.

References:

1. V. G. Brovkin, Yu. F. Kolesnichenko. "Structure and dynamics of stimulated microwave gas discharge in wave beams". J. Moscow Phys. Soc. 5 (1995) 23 - 38.

2. ДИНАМИКА ВИХРЯ В СРЕДЕ С РЭЛЕЕВСКИМ МЕХАНИЗМОМ ЭНЕРГОВЫДЕЛЕНИЯ

Н.А.Герасимов, В.С.Сухомлинов, С.В.Сухомлинов

Научно-исследовательский институт физики СПбГУ, Санкт-Петербург, Ст.Петергоф

Как известно, Рэлеевский механизм энерговыделения заключается в том, что упругая среда обладает тем свойством, что при наличии в ней неоднородностей в областях с большей плотностью выделяется (или поглощается) некоторое количество тепла и наоборот [1,2]. Конкретное количество выделяемого (поглощаемого) в единицу времени тепла зависит от характеристик данной среды. Ранее было исследовано влияние рассматриваемого механизма на распространение акустических и ударных волн [3-6]. Данная работа посвящена исследованию динамики вихревой трубки в сжимаемой Рэлеевской среде и в частности, в плазме самостоятельного газового разряда.

Задача решалась в приближении идеальной сжимаемой жидкости, для чего использовалась нестационарная система уравнений Эйлера. Для бесконечной вихревой трубки получено аналитическое решение для тангенциальной и радиальной составляющей скоростей газа при различном знаке постоянной, характеризующей свойства Рэлеевской среды. Отдельно рассмотрен случай низкотемпературной плазмы газового разряда, для ситуаций, когда электрическое поле в плазме ортогонально и параллельно оси вихревой трубки. В последнем случае обнаружено, что вихревая трубка со временем разрушается. При типичных для плазмы плотностях тока порядка 10 мА/см² и давлениях в десятки Торр, вихрь в воздухе разрушается за времена порядка сотых секунды. Скорость разрушения зависит не только от параметров Рэлеевской среды, но и от интенсивности самого вихря и возрастает при увеличении первоначальной частоты вращения газа. Это объясняется тем, что с ростом интенсивности вихря возрастает

первоначальный градиент плотности в газе, вследствие чего увеличивается воздействие на динамику движения газа Рэлеевского механизма. В работе также проанализировано влияние учета теплопроводности и вязкости газа на скорость разрушения вихря. Показано, что в случае газоразрядной плазмы воздуха эти эффекты незначительны.

Полученные в работе результаты позволяют перейти к разработке плазменных методов управления завихренностью и степенью турбулентности газовых потоков.

Литература.

1. J.W. Strutt, Baron Rayleigh, "The theory of sound", 1926, London, p.33.
2. Н.Л.Александров, А.П.Напортович, «Процессы в газе и плазме с отрицательными ионами», УФН, Т.163, 1993, стр.1-26.
3. Александров Н.Л., Напортович Н.П., Паль А.Ф., Серов А.О., Старостин А.Н., «Усиление звуковых волн в плазме газового разряда», Физика плазмы, т.16, в.7, 1990, стр. 862-870.
4. Soukhomlinov, V.S., Kolosov V.Y., Sheverev, V.A. and Otugen, M.V. "Acoustic dispersion in glow discharge plasma: A phenomenological analysis", *Phys. Fluids*, 14 (2002), 427-429.
5. Наша статья в ЖТФ по Рэлею.
6. Наша статья в ЖТФ по Рэлею.

3. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ КОШИ ДЛЯ УРАВНЕНИЙ В ЧАСТНЫХ ПРОИЗВОДНЫХ ПЕРВОГО ПОРЯДКА МЕТОДОМ ХАРАКТЕРИСТИК И ТРЕХЖИДКОСТНАЯ МОДЕЛЬ ПЛАЗМЫ

В.В.Кучинский, А.Б.Никитенко, В.С.Первухин, И.В.Трофимов

Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем, Санкт-Петербург

Предлагаемый метод основан на имитации методами программирования (на языке любого уровня) процедуры аналитического решения уравнений в частных производных.

Рассмотрим обычную последовательность аналитического решения задачи Коши уравнения в частных производных для функции $z = z(x, y)$ от двух независимых переменных x, y

$$\frac{\partial z(x, y)}{\partial x} + g(x, y)z(x, y) \frac{\partial z(x, y)}{\partial y} = F(x, y, z) \quad (1)$$

Характеристические уравнения для уравнения (1) относительно параметра (в качестве параметра удобно выбрать переменную x) имеют вид [1,2]:

$$\frac{dy(x)}{dx} = g(x, y(x)), \quad (2)$$

$$\frac{dz(x)}{dx} = F(x, y(x), z(x)) \quad (3)$$

Решение этой системы

$$y(x) = \varphi(x) + \psi_1, \quad (4)$$

$$z(x) = \chi(x) + \psi_2, \quad (5)$$

содержит произвольные постоянные ψ_1, ψ_2 . Без ограничения общности начальные условия в задаче Коши можно определить на плоскости ZOY ($x = 0$) заданием функции $z(0, y) = \omega(y)$. Начальные условия, определяющие совокупность точек $\{x = 0, y = \eta, z = \omega(\eta)\}$ позволяют вычислить величину произвольных постоянных ψ_1, ψ_2 :

$$\eta = \varphi(0) + \psi_1(\eta), \quad (6)$$

$$\omega(\eta) = \chi(0) + \psi_2(\eta). \quad (7)$$

Для получения решения в произвольной точке $\{x, y\}$ необходимо выполнение равенства (4):

$$y = \varphi(x) + \psi_1(\eta). \quad (8)$$

Уравнения (6), (7) и (8) представляют собой систему трех уравнений относительно трех неизвестных η, ψ_1, ψ_2 . Если решение исходных уравнений и решение этой системы удастся получить в аналитическом виде, выражение (5) дает решение поставленной задачи. Когда аналитическое решение найти не удастся, можно использовать следующую последовательность действий.

Зададим произвольно в уравнениях начальное значение параметра η и выполним численное решение уравнений (1) и (2) при начальных условиях $x = 0, y = \eta, z = \omega(\eta)$ любым удобным методом (например, методом Рунге-Кутты, Адамса и т.п.). Проведем интерполяцию полученного решения (3) для функции $y(x)$ в окрестности точки x и проверим выполнение условия (8) (условия (6) и (7) удовлетворяются автоматически за счет задания начальных условий при численном решении дифференциальных уравнений (1) и (2)). Если условие (8) не выполняется, скорректируем любым удобным методом (методом Ньютона, например) начальное значение параметра η , решим систему уравнений (1)-(2), снова проведем коррекцию на выполнение уравнения (8) и т.д. Когда значение параметра η станет таким, что уравнение (8) будет выполнено, результат численного расчета уравнения (3) даст нам решение поставленной задачи. Т.о., алгоритм численного расчета можно описать следующим образом.

1. Задание начального значения параметра η .
2. Численное решение системы дифференциальных уравнений первого порядка при заданных параметром η начальных условиях и его аппроксимация в окрестности точки x .
3. Проверка выполнения уравнения (8). Если уравнение (8) не выполняется, проведение коррекции начального значения и переход к п.2. Выполнение условия (8) завершает итерационную процедуру и дает решение задачи Коши в заданной точке $\{x, y\}$.

Можно использовать и более простую процедуру получения решения, исключаящую решение трансцендентного уравнения и связанные с этим повторные численные вычисления решений дифференциальных уравнений. Подробно процедура и алгоритм решения представлены в докладе. В этом методе заранее рассчитываются таблицы $y(x)$ и $z(x)$ при некотором наборе значений параметра η , проводится оценка области изменений возможного изменения переменной y (величины Y_{\min} и Y_{\max} в примере 2), а затем линейной интерполяции отыскивается решение при дискретном наборе переменной $x_k = \frac{xk - xn}{Nr}k$ (вектор X в примере 2). Можно использовать и более точные методы интерполяции, применив их и для нахождения решений в промежутках между дискретными значениями переменной x .

Естественно, предлагаемая процедура может быть применена к уравнениям более высокого порядка и с большим числом переменных, поскольку каждое уравнение (или система уравнений) может быть приведена к системе характеристических уравнений первого порядка от одной переменной [1].

Область применения метода и соответствующие ограничения по его использованию к настоящему времени еще не получены. Предельная простота и общность метода позволяют надеяться на его успешное использование во всех случаях решения уравнений математической физики, когда доказано существование и единственность решения задачи.

В качестве примера использования предлагаемых методов в докладе дано решение сокращенной системы уравнений, описывающих плазму в трехжидкостном приближении.

Литература:

1. Смирнов В.И. Курс высшей математики, т.IV. М., 1957, 812 с.
2. Камке Э. Справочник по дифференциальным уравнениям в частных производных первого порядка. М., 1966, 260 с.

4. ВЛИЯНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ПО ПОВЕРХНОСТИ ВНЕШНЕГО ТЕПЛОВОО ПОТОКА НА РАБОТУ СИСТЕМЫ АКТИВНОЙ ТЕПЛОВОЙ ЗАЩИТЫ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

А.В.Корабельников, В.В.Кучинский, И.В.Тимофеев, Ю.В.Солодкин

Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем, Санкт-Петербург

Доклад посвящен изложению полуэмпирической математической модели термохимического реактора, в которой воздействие теплового потока на ТХР моделируется заданием некоторой функции теплового источника $q(X, Y, Z, \tau)$. Распределение тепловых источников по длине ТХР (по оси X) берется в виде экспоненциальной функции $q(X) = q_0 \exp(-X/X_0)$, линейной или гауссовской функции (или их суперпозиции). Использовано приближение несжимаемого газа (жидкости), плотность газовой смеси и основные параметры, характеризующие тепломассоперенос, считаются постоянными. Будет рассмотрено приближение, в котором интересующие нас функции зависят только от одной координаты X - расстояния от входа в ТХР. При этом выбор некоторых параметров будет производиться таким образом, как будто мы ведем рассмотрение полной трехмерной ситуации, поэтому такое приближение можно считать квазиодномерным. В общем случае система стационарных уравнений тепломассопереноса в трехмерном ТХР имеет вид:

$$\frac{\lambda}{c_p \rho} \nabla^2 T - \bar{w} \nabla T + \frac{DQ^*}{c_p} \nabla^2 \rho_0 - \frac{h_0 - h_\Sigma}{c_p \rho} I_0 + \frac{q}{c_p \rho} = 0, \quad (1)$$

$$D \nabla^2 \rho_0 - \bar{w} \nabla \rho_0 + \frac{k_T D}{T} \nabla^2 T - \frac{I_0}{\rho} = 0.$$

В ТХР поступает смесь из метана и второго суммарного компонента, в который входят все остальные продукты реакции. Относительные концентрации метана и второго компонента смеси обычным образом связаны с соответствующими плотностями ρ_0 и ρ_Σ

$$\rho_0 = \frac{r_0}{(r_0 + r_\Sigma)} = \frac{r_0}{\rho}, \quad \rho_\Sigma = \frac{r_\Sigma}{(r_0 + r_\Sigma)} = \frac{r_\Sigma}{\rho}, \quad \text{причем } \rho_0 + \rho_\Sigma = 1. \quad (2)$$

Вводя безразмерную пространственную переменную $x = \frac{X}{L}$, где L - длина ТХР, получаем систему уравнений

$$\frac{w}{L} \cdot \frac{dT}{dx} + \left(\frac{c_\Sigma}{c_p \rho} T - \frac{Q^*}{c_p \rho} \right) \times I_0 - \frac{q}{c_p \rho} - \frac{w}{L} \cdot \frac{Q^*}{c_p} \cdot \frac{d\rho_0}{dx} = 0,$$

$$\frac{1}{L^2} \cdot \frac{d^2 \rho_0}{dx^2} - \frac{w}{DL} \cdot \frac{d\rho_0}{dx} + \frac{k_T}{T} \cdot \frac{1}{L^2} \cdot \frac{d^2 T}{dx^2} - \frac{I_0}{D\rho} = 0 \quad (3)$$

Входными параметрами задачи являются расход метана g_0 и расход паров воды,

которая на входе в ТХР является единственным компонентом смеси $g_{\Sigma}=g_1$ (кг/с).

Решение первого уравнения получается стандартным методом, если считать, что на входе в ТХР ($x=0$) температура была равна температуре T_0 поступающей на вход ТХР газовой смеси. Полученное при этом условии распределение температуры по длине ТХР дается выражением

$$T(x) = \left(T_0 - \frac{Q_0}{H - \varepsilon} \right) \times e^{-Hx} + \frac{Q_0}{H - \varepsilon} e^{-\varepsilon x}, \quad (4)$$

$$\text{где } Q_0 = \frac{q_0 L}{w c_p \rho}, \quad H = \frac{c_{\Sigma} L I_0}{w \rho \cdot c_p}.$$

Вычисление относительных весовых концентраций остальных компонентов проводится по формулам

$$\begin{aligned} \rho_1(x) &= \bar{\rho}_1 - \frac{M_1}{M_0} \frac{2k+1}{k+1} [\bar{\rho}_0 - \rho_0(x)], \quad \rho_2(x) = \frac{M_2}{M_0} \frac{1}{k+1} [\bar{\rho}_0 - \rho_0(x)], \\ \rho_3(x) &= \frac{M_1}{M_0} \frac{1}{k+1} [\bar{\rho}_0 - \rho_0(x)], \quad \rho_4(x) = \frac{M_4}{M_0} \frac{4k+3}{k+1} [\bar{\rho}_0 - \rho_0(x)] \gamma_H, \end{aligned} \quad (5)$$

где индекс "1" закреплен за H_2O , "2" за CO , "3" за CO_2 и "4" за H_2 .

Таким образом, в нулевом приближении получены распределения концентрации и температуры по длине ТХР. Дальнейшее уточнение легко сделать, подставив полученное распределение температуры (4) во второе уравнение (3) для более точного определения концентрации метана, а вслед за этим - и всех других компонентов.

В докладе приведены результаты расчетов влияния различных форм распределения теплового потока, поступающего на поверхность термохимического реактора, на температуру и концентрацию метана. Рассчитано распределения концентраций газов, температуры и степени конверсии метана по длине ТХР.

5. ОЦЕНКА ИЗМЕНЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПЛАЗМЫ ПРОДУКТОВ СГОРАНИЯ ПРИ ПРОХОЖДЕНИИ АКУСТИЧЕСКИХ ВОЛН С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИБЛИЖЕННОГО РЕШЕНИЯ УРАВНЕНИЙ ТРХЖИДКОСТНОЙ МОДЕЛИ ПЛАЗМЫ

В.В.Кучинский, А.Б.Никитенко, В.С.Первухин, И.В.Трофимов, Ю.Н.Филимонов
Научно-исследовательское предприятие гиперзвуковых систем, Санкт-Петербург

При разработке новых методов диагностики тепловых двигателей путем измерения электрофизических параметров плазмы продуктов сгорания требуется оценить связь между основными характеристиками двигателя (температурой и пульсационной составляющей давления) и величинами измеряемых потенциалов и проводимостей [1]. В докладе предложен и использован простой метод оценки потенциала и плотности тока на основе приближенного решения системы уравнений, описывающих низкотемпературную плазму продуктов сгорания в трехжидкостной модели.

Система нестационарных уравнений включает в себя уравнения движения электронного и ионного компонентов

$$n_e m_e \left(\frac{\partial}{\partial t} + U_e \nabla \right) U_e + \frac{e n_e}{\mu_e} (U_e - U_a) + \nabla p_e - e n_e E = 0, \quad (1)$$

$$n_i m_i \left(\frac{\partial}{\partial t} + U_i \nabla \right) U_i + \frac{e n_i}{\mu_i} (U_i - U_a) + \nabla p_i + e n_i E = 0, \quad (2)$$

уравнение ионизационного равновесия среды в форме Саха, представляемое в виде

$$\frac{\alpha\eta}{(1-\alpha)(1+\eta)} = s(x, t) = 6.666798 \cdot 10^{-2} \frac{T^{\frac{3}{2}}}{P_{\Sigma}} e^{-\frac{\nu}{kT}}, \quad (3)$$

зависимости для среднemasовых плотности и скорости

$$\rho_{\Sigma} = \frac{m_e \eta + m_i \alpha + m_a (1-\alpha)}{1+\eta} \frac{P_{\Sigma}}{kT}, \quad U_{\Sigma} = \frac{m_e U_e \eta + m_i U_i \alpha + m_a U_a (1-\alpha)}{m_e \eta + m_i \alpha + m_a (1-\alpha)}, \quad (4)$$

уравнение неразрывности потока, уравнение сохранения заряда и уравнение Пуассона

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho_{\Sigma} + \nabla(\rho_{\Sigma} U_{\Sigma}) = 0, \quad \frac{\partial}{\partial t} q + \nabla \theta_k = 0, \quad \nabla E - \frac{1}{\varepsilon_0} q = 0. \quad (5)$$

Здесь $\mu_e = \frac{e}{m_e Q_{ea}} \sqrt{\frac{\pi m_e}{8kT}} \frac{(1+\eta)kT}{(1-\alpha)P_{\Sigma}}$ и $\mu_i = \frac{e}{m_i Q_{ia}} \sqrt{\frac{\pi m_i}{8kT}} \frac{(1+\eta)kT}{(1-\alpha)P_{\Sigma}}$ - подвижности

электронного и ионного компонентов соответственно, $q = e \frac{P_{\Sigma}(\alpha - \eta)}{kT(1+\eta)}$ - локальная

плотность некомпенсированного (избыточного) заряда, $\theta_k = e(\alpha U_i - \eta U_e) \frac{P_{\Sigma}}{(1+\eta)kT}$ -

конвективная составляющая плотности электрического тока.

Система сводится к восьми линейно независимым соотношениям между десятью функциями: $U_e, U_i, U_a, \rho_{\Sigma}, U_{\Sigma}, \alpha, \eta, E, P_{\Sigma}, T$. Система замыкается предположением о том, что функции P_{Σ}, T как определяющие характер акустических воздействий рассматриваются как известные

$$P_{\Sigma} = p_0 \left[1 + c \cos\left(\frac{2\pi n_1 f_0}{a_0} x\right) \sin(2\pi n_1 f_0 t) \right], \quad T = T_0 \left[1 + c \cos\left(\frac{2\pi n_1 f_0}{a_0} x\right) \sin(2\pi n_1 f_0 t) \right]. \quad (6)$$

Всю совокупность выражений (1)-(6) удается свести к системе трех уравнений относительно неизвестных относительных скоростей электронов $u_e = U_e / U_0$, ионов

$u_i = U_i / U_0$ ($U_0 = \sqrt{\frac{8kT_0}{\pi m_e}}$) и степени ионизации α :

$$\frac{\partial u_e}{\partial \tau} = -K_0 u_e \frac{\partial u_e}{\partial z} + K_1 \frac{u_a - u_e}{\mu_e} - K_0 F + K_2 E,$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial \tau} = -K_0 u_e \frac{\partial u_i}{\partial z} + K_1 \frac{u_a - u_i}{\mu_e} \frac{Q_{ia}}{Q_{ea}} \sqrt{\frac{m_e}{m_i}} - K_0 \frac{m_e}{m_i} F + K_2 \frac{m_e}{m_i} E, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} = \frac{\alpha}{\alpha^2 + (1+\alpha^2)s} \left[(1-\alpha^2) \frac{\partial s}{\partial \tau} - K_0 \alpha \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\alpha u_i - \eta u_e}{1+\eta} \right) \right],$$

где $K_0 = \sqrt{\frac{8k}{\pi m_e \gamma R}} = 310$, $K_1 = \frac{e}{m_e f_0}$, $K_2 = \frac{e}{f_0} \sqrt{\frac{\pi}{8kT_0 m_e}}$ и

$$F = -\frac{\pi}{8} \left[2\pi c \sin(2\pi z) \sin(2\pi \tau) \left(\frac{5}{2} + \frac{eV}{kT_0 g} \right) + \frac{g}{\alpha} \frac{\partial \alpha}{\partial z} \right], \quad g = 1 + c \sin(2\pi \tau) \cos(2\pi z).$$

Пренебрегая скоростью ионов и атомов по сравнению со скоростью электронов и подставляя соответствующие численные значения, получим систему из двух уравнений

$$\frac{\partial u_e}{\partial \tau} = -K_0 u_e \frac{\partial u_e}{\partial z} - K_3 \sqrt{g} u_e + K_4 \int_0^z w dz - K_0 F, \quad w = \alpha(1+s) - s/\alpha, \quad (8)$$

$$\frac{\partial \alpha}{\partial \tau} = -\frac{K_0 u_e}{1 + \alpha^2 / s} \frac{\partial \alpha}{\partial z} + \frac{\alpha}{1 + \alpha^2 / s} \left[K_0 \frac{\partial u_e}{\partial z} + \frac{2\pi c}{g} \left(\frac{3}{2} + \frac{eV}{kT_0 g} \right) (\cos(2\pi z) \cos(2\pi \tau) - K_0 u_e \sin(2\pi z) \sin(2\pi \tau)) \right]$$

Про небольших амплитудах акустических волн ($c \ll 1$) и характерных для ЖРД давлениях и температурах из первого уравнения (8) можно получить приближенную формулу для оценки $U_e = u_e U_0$.

$$U_e \approx U_0 \frac{1}{g} \left(1.1 \cdot 10^{16} \frac{1}{f_0} \int_0^z w dz - 4.6 \cdot 10^{-6} \frac{f_0 T_0}{P_0} F \right). \quad (9)$$

Решение уравнений (8) проводилось итерациями методом характеристик.

Результаты вычислений и полученные формулы позволяют сделать следующие выводы.

При сравнительно больших потенциалах ионизации $v \geq 10$ эВ скорость электронов пропорциональна частоте и обратно пропорциональна давлению. Из второго уравнения (8) видно, что степень ионизации $\alpha \approx \sqrt{s}$ и зависит от давления и частоты только через зависимость скорости от P_Σ, f_0 . Соответственно, плотность тока

$$j = en_e U_e \approx ea \frac{P_\Sigma}{kT_0} U_e \text{ пропорциональна частоте. И скорость, и плотность тока}$$

пропорциональны амплитуде модуляции c .

Полученные формулы позволяют с достаточно хорошей точностью проводить оценки влияния акустического возмущения на локальные характеристики плазмы продуктов сгорания. Предложенный метод оценок может быть полезен при разработке диагностических методов и исследованиях акустических волн в низкотемпературной плазме.

Литература:

1. А.Л. Куранов, В.В.Кучинский, В.А.Пинчук, Ю.Н.Филимонов. Электрофизические явления и прохождение ударных и акустических волн в плазме продуктов сгорания. «Полет». 2004, №**, стр.***.

6. ПРОБЛЕМЫ КАТАЛИЗА ПРИ ПОЛУЧЕНИИ ВОДОРОДА

Власов Е.А., *Куранов А.Л., *Корабельников А.В., Постнов А.Ю., Прокопенко А.Н.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт (технический университет), *ОАО «НИПГС» ХК «Ленинец»

К XX столетию полностью сформировалась экономика, основанная на ископаемых топливах (угле, нефти, газе). Однако неуклонно возросло число и частота экологических катастроф: кислотные дожди, парниковый эффект, озоновые дыры, смог и др. Альтернативным топливом может быть водород или топливный газ, сжигание которого не дает вредных выбросов. Основные положения сформированной в настоящее время концепции водородной энергетики следующие: 1) производство водорода из воды с использованием невозобновляемых (уголь, природный газ, атомная энергия и т.д.) и возобновляемых источников энергии (солнце, ветер, биомасса и т.д.); 2) транспортировка и хранение водорода; 3) использование водорода в промышленности, на транспорте и в быту; 4) проблемы надежности водородной техники и безопасности водородных энергетических систем и проблема конструкционных и функциональных материалов

(катализаторы, мембраны, накопители водорода на основе благородных и редких элементов).

Следует отметить еще одну проблему, связанную с водородной безопасностью атомных электростанций (АЭС), которая основывается на применении автоматических средств регулирования и использовании специальных мер по защите. Последнее включает как контроль концентрации водорода в служебных помещениях, так и активное каталитическое окисление H_2 , образующегося при аварии в системах охлаждения активной зоны. Проблемы получения водорода тесно связаны также с реализацией каталитических процессов в специально сконструированных конверторах, в которых одновременно протекают экзо- и эндотермические процессы. Катализаторы для таких реакторов на основе высокопористых ячеистых материалов могут быть с успехом использованы и для получения водорода из углеводородных газов для топливных элементов.

Безусловно, производство и использование водорода и топливных газов не может быть реализовано без катализаторов. Существующие разработки катализаторов базировались на научных достижениях 60-70 годов прошлого столетия, используя традиционные методы приготовления (смешения, соосаждения, пропитки). Однако успехи нанотехнологии за последние годы заставили пересмотреть существующие составы и технологии применяемых катализаторов. Широко используемые (молекулярное наслаивание, плазменное напыление, золь-гель метод, механо-химическое активирование, гидротермальное модифицирование), а также новые перспективные нанотехнологии (лазерное электродиспергирование, экстракционно-пиролитический способ и другие) открывают широкие возможности по улучшению свойств катализаторов, решению проблем получения топливных газов.

Для успешного решения задач при получении водорода и топливного газа в ближайшие годы потребуются специалисты различного профиля, в том числе подготовленные в области катализа, теплофизики, химии и технологии катализаторов и сорбентов, физике и химии горения топлива, конструирования и управления каталитическими конверторами и других разделах современной науки.

6. PROBLEMS OF CATALYSIS AT HYDROGEN PRODUCTION

Vlasov Ye.A., *Kuranov A.L., *Korabelnikov A.V., Postnov A.Yu., Prokopenko A.N.

St. Petersburg state technological institute (Engineering University)

** Hypersonic Systems Research Institute of the Leninetz Holding Company, St. Petersburg*

By the 20th century, the economy based on fossil fuels (coal, oil, gas) has been fully shaped. But at the same time, ecological disasters such as acid rains, greenhouse effect, ozone holes, smog, etc. are steadily growing in number and frequency. Hydrogen or fuel gas the combustion of which does not result in harmful emissions could be used as alternative fuel. Fundamental tenets of the present day hydrogen energy conception are as follows:

1. Hydrogen production from the water using non-renewable (coal, natural gas, nuclear energy, etc.) and renewable energy sources (sun, wind, biomass, etc.);
2. Hydrogen transportation and storage;
3. Industrial, residential and transportation hydrogen usage;
4. Reliability issues of hydrogen engineering and safety of hydrogen energy systems; the problem of construction and function materials (catalysts, membranes, hydrogen collectors on the basis of noble and rear-earth elements).

One more problem associated with hydrogen safety of nuclear power plants needs to be mentioned here. It is based on the usage of automatic control systems and special protection measures. The latter includes both monitoring of hydrogen concentration in the indoor offices

and active catalytic oxidation H_2 resulting from emergency cases in the cooling systems of active zone. The problems of hydrogen production are also closely connected with realization of catalytic processes in specially designed converters wherein exothermic and endothermic processes occur at the same time. The catalysts for such reactors on the base of highly cellular materials can be successfully used for the hydrogen production from hydrocarbon gases for the fuel elements.

It goes without saying, that production and usage of hydrogen and fuel gases can not be realized without catalysts. The existing catalyst samples have been developed on the basis of scientific achievements in the sixties-seventies of the last century using traditional preparation techniques (such as mixing, co-precipitation and impregnation). But accomplishments of n-technology over the last years have caused revision of the existing compositions and catalyst processing techniques. Extensively used molecular lay-up, plasma spraying, sol-gel method, mechanochemical activation, hydrothermal modification and also new advanced n-technologies (such as laser electrodissolution, extraction-and-pyrolysis technique and others) open up new opportunities for enhancement of catalyst properties and solution of the problems associated with fuel gases production.

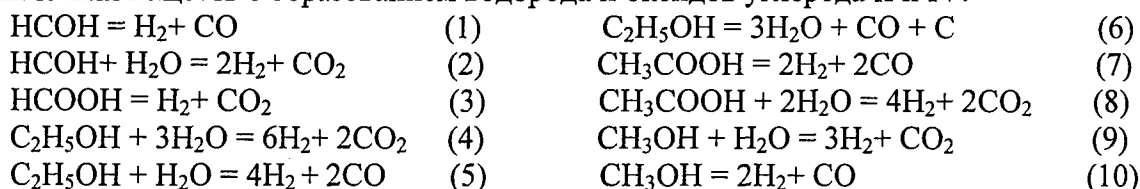
7. ТЕРМОДИНАМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА СЫРЬЯ ДЛЯ ТОПЛИВНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Петраченко А.С., Котов Д.Н., Лавринцев Е.И., Постнов А.Ю

*Санкт-Петербургский государственный технологический институт
(Технический университет)*

Для портативных и низкотемпературных топливных элементов в качестве перспективного сырья могут быть использованы органические кислоты, спирты, кетоны и др., из которых прямым электроокислением или конверсией водных растворов на платиновом катализаторе-аноде возможно получение водорода. В данной работе проведен термодинамический анализ ряда химических превращений с образованием H_2 и оксидов углерода.

Для получения водорода были предложены реакции разложения и конверсии органических веществ с образованием водорода и оксидов углерода II и IV:



Расчет изобарно-изотермических потенциалов (ΔG_T) предлагаемых реакций производили по методу Темкина-Шварцмана в интервале температур от $25^\circ C$ до $450^\circ C$. Для оценки энергетических возможностей рассматриваемых реакций рассчитана величина удельной энергоёмкости ω ($Вт/(ч \cdot см^3)$) по уравнению: $\omega = \Delta G_T \cdot \rho / (3600 \cdot M)$, где ρ - плотность, $г/см^3$; M - молярная масса, $г/моль$. Так как в идеальной электрохимической системе происходит термодинамически обратимое превращение химических веществ, то максимальная электрическая работа, совершаемая при этом, равна изменению изобарно-изотермического потенциала. Поэтому анализ удельной энергоёмкости характеризует теоретические (термодинамические) энергетические свойства различных веществ.

С точки зрения количества водорода, выделяющегося при разложении 1 моля исходного реагента, наиболее перспективным сырьем оказываются этанол (6 молей H_2 по реакции (3) и 4 моля по реакции (6)), уксусная кислота (4 моля H_2 по реакциям (4) и (9)) и метанол (3 моля H_2 по реакции (5)). Термодинамический анализ данных реакций показывает, что они не могут быть реализованы при низких температурах. Конверсия

метанола становится термодинамически возможной при температуре выше 50°C. Остальные из перечисленных веществ разлагаются при значительно больших температурах, что нежелательно для использования в топливных элементах. Поэтому возникает интерес к реакциям, дающим меньший выход по водороду, но при этом происходящих при низких температурах. Таковыми являются реакции (1), (2), (6).

Анализ зависимости величины энергоемкости от температуры показывает, что наиболее перспективным сырьем для синтеза водорода в топливных элементах является формальдегид и муравьиная кислота. При этом следует заметить, что с увеличением температуры удельные энергоемкости, соответствующие реакциям (4) и (9) растут гораздо быстрее, и при температуре порядка 400-450°C начинают превышать энергоемкость первой реакции.

Проведенный анализ позволяет говорить о необходимости вести дальнейшие исследования в трех направлениях:

- разработка портативных топливных элементов на основе метанола;
- разработка портативных топливных элементов на основе формальдегида и муравьиной кислоты;
- разработка процессов высокотемпературной конверсии этанола.

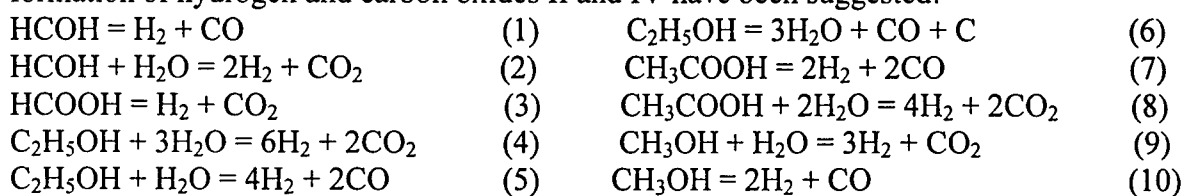
7. THERMODYNAMIC JUSTIFICATION OF FEEDSTOCK SELECTION FOR FUEL ELEMENTS

Petrachenkova A.S., Kotov D.N., Lavrinets Ye.I., Postnov A.Yu.

The St. Petersburg State Technological Institute (Engineering University)

Organic acids, alcohols, ketones, etc. from which hydrogen could be obtained through direct electrooxidation or conversion of water solutions on platinum anode catalyst could serve as a promising feedstock for the portable and low-temperature fuel elements. In this paper we present thermodynamic analysis of a number of chemical transformations resulting in H₂ and carbon oxides formation.

To produce hydrogen, reactions of decomposition and conversion of organic matters with formation of hydrogen and carbon oxides II and IV have been suggested:



Calculation of isobar-isotherm potentials (ΔG_T) of the proposed reactions was performed in Tyemkin-Schwarzman method in the temperature range from 25° C to 450° C. To evaluate energy potentialities of the reactions under considerations, specific energy capacity value ω was computed ($\text{W/h}\cdot\text{cm}^3$) according to the following equation: $\omega = \Delta G_T \cdot \rho / (3600 \cdot M)$ where ρ is density, g/cm^3 ; M – molar mass, g/mole .

Inasmuch as in the ideal electrochemical system thermodynamically reversible transformation of chemical matters takes place, the maximum electric work performed therewith is equal to isobar-isotherm potential variation. Therefore, analysis of specific energy capacity characterizes theoretical (thermodynamic) energy properties of different matters.

From the quantitative point of view as regards hydrogen obtained at decomposition of 1 mole of initial reagent, the most promising feedstock proved to be ethanol (6 H₂ moles as per reaction (3) and 4 moles as per reaction (6); acetic acid (4 moles as per reactions (4) and (9); and methanol (3 moles of H₂ as per reaction (5). Thermodynamic analysis of these reactions shows that they can not be realized under low temperatures. Methanol conversion becomes

thermodynamically possible at temperature exceeding 50° C. The rest of the listed matters decompose under considerably higher temperatures which is undesirable for the usage with fuel elements. This raises the question to the reactions with lower hydrogen yield but occurring under low temperatures. Such are reactions (1), (2), (6).

Analysis of the amount of energy capacity dependence on temperature reveals that the most promising feedstock for hydrogen synthesis in fuel elements is formaldehyde and formic acid. It needs to be noted thereat that with temperature increase specific energy capacities corresponding to the reactions (4) and (9) are increased more rapidly and at temperatures ~ 400-450° C begin to exceed energy capacity of (1) reaction.

The performed analysis suggests that further investigations should be focused on the following:

- development of the portable fuel elements on basis of methanol;
- development of the portable fuel elements on basis of formaldehyde and formic acid;
- development of high-temperature ethanol conversion processes.

8. ПРОГРАММНЫЙ ПАКЕТ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ КИНЕТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ И ЭМИССИОННЫХ СПЕКТРОВ В ГАЗОРАЗРЯДНОЙ ПЛАЗМЕ

Д.В.Хмара, Ю.Ф.Колесниченко

Институт Высоких Температур РАН, Москва, Россия

Представлен программный пакет для моделирования кинетических процессов и эмиссионных спектров в газоразрядной плазме. Пакет состоит из взаимосвязанных программных блоков, предназначенных для решения некоторых базовых задач, связанных с неравновесными газовыми средами.

Составляющие пакета образуют следующую иерархию:

1. поддерживаемая база данных "BBASE 5" химических, энергообменных и зарядовых реакций (около 6000 реакций, свыше 15000 записей для констант скорости реакций из более 1300 литературных источников – по состоянию на конец марта 2006 г.), описывающих воздух с различными, в том числе и горючими, примесями в неравновесных условиях;
2. программа численного решения уравнения Больцмана для распределения электронов по энергиям в газовых смесях во внешнем электрическом поле "EEDF", снабженная базой данных для наборов сечений столкновений электрон-нейтрал в различных газах (инертных, N₂, O₂, H₂, CO, CO₂, O, H, углеводородах, галогензамещенных углеводородах и т.д.);
3. генератор кинетических механизмов "KINGEN", связанный с "BBASE 5" и "EEDF" и предназначенный для синтеза и накопления базы данных кинетических механизмов "kinetic mechanisms database" таких, например, как "сухой воздух" (N/O), "влажный воздух" (N/O/H), "горючие смеси воздуха с углеводородами" (N/O/H/C);
4. программа решения систем эволюционных уравнений для концентраций веществ "KIN", использующая в качестве входных данных механизмы из "kinetic mechanisms database", включающая справочник по термодинамическим свойствам индивидуальных веществ и встроенный обработчик спектров;
5. программа "SPECTRA 2", предназначенная для обработки экспериментальных эмиссионных спектров атомов и молекул при условии того, что реальные спектры являются многокомпонентными.

Программный пакет разработан для операционной системы MS Windows.

Приведены также примеры применения пакета при исследованиях СВЧ газоразрядной плазмы.

8. SOFTWARE PACKAGE FOR KINETIC AND SPECTRA EMISSION MODELING OF GAS DISCHARGE PLASMA

D.V.Khmara, Yu.F.Kolesnichenko

Institute of High Temperatures RAS, Moscow

Software package for modeling of kinetic processes and spectra emission of gas discharge plasma is introduced. The package consists of interrelated software items, which are assigned for solving of some basic problems connected with non-equilibrium mediums.

The constituents are:

1. the continuously maintained database "BBASE 5" for chemical, energy exchange and charged reactions (about 6000 reactions, above 15000 records of rate constants from above 1300 literature sources - at the end of March 2006) is adapted for non-equilibrium air with various admixtures included the combustible admixtures;

2. the solver of Boltzmann equation for electron energy distribution function in gas mixtures "EEDF" supplied by the database for cross sections sets for various gases (the noble ones, N₂, O₂, H₂, CO, CO₂, O, H, hydrocarbons, halocarbons, etc.);

3. the generator of kinetic mechanisms "KINGEN" joined with "BBASE 5" and "EEDF" and assigned for the storage of kinetic mechanisms database (for example "dry air", "humid air", "combustible mixture of air and hydrocarbons");

4. the solver of the set of kinetic equations for species concentrations dynamics "KIN" with input data from kinetic mechanisms database is included, as well as a handbook for thermodynamic properties of individual substances with corresponding database and embedded spectra processor;

5. the spectra processor "SPECTRA 2" is adopted for processing of experimental emission spectra under conditions of theirs multi-component composition.

The software package is designed for Windows environment. Examples of the package application to problems of MW discharge plasma investigation are also presented.
